Environnement Canada Environment Canada

Institut national de recherche en hydrologie

RAPPORT INRH N° 30

ÉTUDE N° 149, SÉRIE SCIENTIFIQUE DE LA DGEI

Détermination des propriétés hydrauliques d'un petit système d'écoulement souterrain dans un gneiss monzonitique fracturé

K.G. Raven

INRH

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN HYDROLOGIE
DIRECTION GÉNÉRALE DES EAUX INTÉRIEURES ET DES TERRES
SASKATOON, SASKATCHEWAN, 1987

(Available in English upon request)

Publié avec l'autorisation
du ministre de l'Environnement

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1987

Nº de cat. En 36-502/149F

ISBN 0-662-94176-2

Table des matières

	Page
RÉSUMÉ	viii
ABSTRACT	viii
REMERCIEMENTS	ix
INTRODUCTION	1
DESCRIPTION DU SITE	1
Emplacement	1
Géologie	4
PROGRAMME DE FORAGE	4
DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS DU SYSTÈME DE FRACTURES	7
Cartographie des fractures en surface	7
Diagraphies de fractures dans les trous de sondage	8
INSTALLATION DES TUBAGES DANS DES TROUS DE SONDAGE	13
ESSAIS D'INJECTION À PACKER DOUBLE	15
Méthode	15
Résultats	16
ESSAIS D'INTERFÉRENCE HYDRAULIQUE	19
Méthode	19
Résultats	20
Zone de fractures n° 1	22
Zone de fractures n° 2	28
Zone de fractures n° 3	31
Zone de fractures n° 4	31
Propriétés d'écoulement vertical dans la masse rocheuse	33
SURVEILLANCE DES HAUTEURS PIÉZOMÉTRIQUES	35
Distribution des hauteurs piézométriques	35
Masse rocheuse	35
Zone et fractures nos 1, 2, 3 et 4	38
DÉTERMINATION DES TENSEURS DE CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE	40
Description du modèle	40
Résultats	41
SOMMAIRE	45
RÉFÉRENCES	47
ANNEXE A. Diagraphies des fractures, trous de sondage FS-1 à FS-17	49
ANNEXE B. Données des essais d'injection à packer double, trous de sondage FS-1 à FS-17	107

Table des matières (suite)

Page

ANNEXE C. Courbes du rabattement en fonction du temps (log), trou de sondage FS-10 119

ANNEXE D. Tenseurs de conductivité hydraulique 129

Tableaux

1. Longueur et orientation des trous de sondage 7
2. Altitude et emplacement de la bague du trou de sondage. 7
3. Orientation moyenne des principaux ensembles de fractures parallèles identifiés par cartographie des fractures de surface et dans les trous de sondage 8
4. Orientation moyenne des principaux ensembles de fractures parallèles souterraines dans trois zones 13
5. Mesures des intervalles d'essais FS. 14
6. Propriétés hydrauliques des intervalles d'essais FS 18
7. Résumé des essais d'interférence hydraulique 21
8. Propriétés hydrauliques de la masse rocheuse entourant la zone de fractures n° 1, déterminées à partir des essais de pompage FS-10 et en utilisant le modèle de fractures à flux uniforme de Gringarten 27
9. Ouverture équivalente calculée pour une seule fracture — zone de fractures n° 1 28
10. Propriétés d'emmagasinage des fractures — zone de fractures n° 1. 28
11. Ouverture équivalente calculée pour une seule fracture — zones de fractures n^{os} 2 et 4. 30
12. Propriétés d'emmagasinage des fractures — zones de fractures n^{os} 2 et 4 30
13. Ouverture équivalente calculée pour une seule fracture — zone de fractures n° 3 31
14. Propriétés d'emmagasinage des fractures — zone de fractures n° 3. 31
15. Diffusivité hydraulique verticale. 35
16. Hauteur piézométrique à l'équilibre dans les intervalles d'essais FS 37

Illustrations

Figure 1. Approche pour étude des caractéristiques de l'écoulement souterrain dans une roche fracturée 1
Figure 2. Emplacement des Laboratoires nucléaires de Chalk River 2
Figure 3. Emplacement des sites d'études hydrogéologiques de l'INRH. 3
Figure 4. Emplacement du site de l'étude de l'écoulement souterrain des LNCR par rapport aux zones importantes et secondaires de failles et de fractures déterminées par analyse des arrangements structuraux par photographies aériennes et levés électromagnétiques à très basse fréquence au sol 5
Figure 5. Carte du site de l'étude de l'écoulement des eaux souterraines des LNCR 6

Illustrations (suite)

Page

Figure 6. Contours des ensembles de pôles représentant les fractures mesurées dans les affleurements du site de l'étude sur l'écoulement des eaux souterraines des LNCR 9

Figure 7. Contours des ensembles de pôles représentant les fractures observées par image dans les trous de sondage de la série FS 10

Figure 8. Contours des ensembles de pôles représentant les fractures enregistrées par image acoustique dans les trous de sondage de la série FS. 11

Figure 9. Carte du site et données concernant l'orientation des fractures déterminées par cartographie de surface et des trous de sondage. 12

Figure 10. Schéma illustrant un tubage à packers et tuyaux de refoulement multiples installés dans chacun des trous de sondage de la série FS 13

Figure 11. Schéma de l'équipement en surface utilisé pour les essais d'injection à packer double et les pompages d'essai à tubage à packer 15

Figure 12. Schéma de l'équipement souterrain utilisé pour les essais d'injection à packer double et les pompages d'essai dans des trous de sondage à tubage à packer. 15

Figure 13. Schéma d'un essai d'injection à packer double dans une fracture simple 17

Figure 14. Distribution du logarithme à base 10 de la conductivité hydraulique équivalente de la masse rocheuse k_{erm} dans les trous de sondage FS-1 à FS-17, mesurée par des essais d'injection à packer double 17

Figure 15. Schéma d'un essai d'interférence hydraulique à débit constant dans deux trous de sondage 19

Figure 16. Coupe verticale dans la partie centrale du site à l'étude des LNCR illustrant les quatre zones de fractures identifiées à partir des essais hydrauliques. 22

Figure 17. Rabattement en fonction du temps de réponse (log) des puits de pompage et des intervalles d'observation traversant la zone de fractures nº 1. Pompage d'essai FS-10, 20 au 27 août 1982 23

Figure 18. Rabattement en fonction du temps de réponse (log) des puits de pompage et des intervalles d'observation traversant la zone de fractures nº 1. Pompage d'essai FS-10, 27 au 29 septembre 1983 23

Figure 19. Rabattement (log) en fonction du temps de réponse (log) pour les puits de pompage et les intervalles d'observation traversant la zone de fractures nº 1. Pompage d'essai FS-10, 20 au 27 août 1982 25

Figure 20. Rabattement (log) en fonction du temps de réponse (log) pour les puits de pompage et les intervalles d'observation traversant la zone de fractures nº 1. Pompage d'essai FS-10, 27 au 29 septembre 1983 25

Figure 21. Réponse du rétablissement du niveau de l'eau du puits de pompage FS-10 et de l'intervalle d'observation FS 9-2 traversant la zone de fractures nº 1 26

Figure 22. Rabattement (log) en fonction du temps de réponse (log) dans la zone de fractures nº 1 durant deux pompages d'essai effectués à partir du trou de sondage FS-10. Courbes à ajustement optimal du modèle de fractures à flux uniforme horizontal unique de Gringarten et Ramey (1974) 26

Figure 23. Rabattement (log) en fonction du temp de réponse (log) pour les intervalles d'observation traversant la zone de fractures nº 1, avec courbes de Theis à ajustement optimal. Pompage d'essai FS 7-3, 1er octobre 1982. 29

Figure 24. Rabattement (log) en fonction du temps de réponse (log) pour les intervalles d'observation traversant la zone de fractures nº 1, avec courbes de Theis à ajustement optimal. Pompage d'essai FS 8-2, 2 octobre 1982 29

Illustrations (suite)

Page

Figure 25. Rabattement (log) en fonction du temps de réponse (log) pour les intervalles d'observation traversant la zone de fractures nº 1, avec courbes de Theis à ajustement optimal. Pompage d'essai FS 9-2, 4 octobre 1982 29

Figure 26. Rabattement (log) en fonction du temps de réponse (log) pour les intervalles d'observation traversant la zone de fractures nº 1, avec courbes de Theis à ajustement optimal. Pompage d'essai FS 10-1, 5 octobre 1982 29

Figure 27. Rabattement (log) en fonction du temps de réponse (log) pour les intervalles d'observation traversant la zone de fractures nº 2, avec courbes de Theis à ajustement optimal. Pompage d'essai FS 4-2, 16 au 19 août 1982 30

Figure 28. Rabattement (log) en fonction du temps de réponse (log) pour les intervalles d'observation traversant la zone de fractures nº 3, avec courbes de Theis à ajustement optimal. Pompage d'essai FS 6-1, 13 au 16 octobre 1982 32

Figure 29. Rabattement (log) en fonction du temps de réponse (log) pour les intervalles d'observation traversant la zone de fractures nº 3, avec courbes de Theis à ajustement optimal. Pompage d'essai FS 6-1, 27 octobre 1983 32

Figure 30. Rabattement (log) en fonction du temps de réponse (log) pour les intervalles d'observation traversant la zone de fractures nº 3, avec courbes de Theis à ajustement optimal. Pompage d'essai FS 11-2, 27 au 29 octobre 1982 32

Figure 31. Rabattement (log) en fonction du temps de réponse (log) pour les intervalles d'observation traversant la zone de fractures nº 3, avec courbes de Theis à ajustement optimal. Pompage d'essai FS 15-3, 24 au 26 octobre 1983 32

Figure 32. Rabattement (log) en fonction du temps de réponse (log) pour des intervalles d'observation du trou de sondage FS-7 présentant une réponse verticale au pompage dans la zone de fractures nº 1 (zone à K élevée) traversant l'intervalle FS 7-3 34

Figure 33. Rabattement (log) en fonction du temps de réponse (log) pour des intervalles d'observation du trou de sondage FS-3 présentant une réponse verticale au pompage dans la zone de fractures nº 1 (zone à K élevée) située sous le fond du trou de sondage FS-3 34

Figure 34. Hydrographe pour des intervalles d'essai dans le trou de sondage incliné FS-2, janvier 1982 à novembre 1984 36

Figure 35. Régimes d'écoulement des eaux souterraines dans la zone de fractures nº 2, estimés à partir des données sur les hauteurs piézométriques à l'équilibre enregistrées le 15 décembre 1982 et le 1er novembre 1984 39

Figure 36. Régimes d'écoulement des eaux souterraines dans la zone de fractures nº 3, estimés à partir des données sur les hauteurs piézométriques à l'équilibre enregistrées le 15 décembre 1982 et le 1er novembre 1984 39

Figure 37. Distribution des logarithmes à base 10 des ouvertures réelles des fractures, $2b_{eff}$ dans les trous de sondage FS-1 à FS-17, déterminés à partir d'essais d'injection à packer double et de diagraphies obtenues par image acoustique dans les trous de sondage 41

Figure 38. Ellipsoïde de conductivité hydraulique et axes de référence dans trois directions. 42

Illustrations (suite)

Page

Figure 39. Diagramme stéréographique des pôles perpendiculaires au plan principal de conductivité hydraulique K_1, K_2 pour les intervalles d'essai FS 43

Figure 40. Graphique illustrant la moyenne harmonique des conductivités hydrauliques verticales calculée à partir du modèle orientation-ouverture des fractures en fonction de la diffusivité hydraulique verticale déterminée à partir des essais de pompage 44

Figure 41. Diagramme isométrique du site de l'étude de l'écoulement des eaux souterraines des LNCR illustrant l'emplacement des trous de sondage d'essai, de la zone de fractures n° 1 et du dyke de diabase..... 46

Figure 42. Diagramme isométrique du site de l'étude de l'écoulement des eaux souterraines des LNCR illustrant l'emplacement des trous de sondage d'essai, des zones de fractures n°s 2, 3 et 4 et du dyke de diabase..... 46

Résumé

Les propriétés hydrauliques d'un petit système d'écoulement souterrain dans un bloc de gneiss monzonitique fracturé de 200 m par 150 m par 50 m de profondeur situé à Chalk River (Ontario), ont été déterminées à partir d'études en surface et de sondages. Des études en surface, notamment des analyses par photographie aérienne des arrangements structuraux, des examens géophysiques au sol et aériens et la cartographie des fractures, ont permis de déterminer le système de fractures à l'échelle locale et régionale, de connaître les caractéristiques du site étudié et d'orienter le programme de forages d'exploration. Des études de reconnaissance du sous-sol (17 trous de sondage) ont été achevées et comportaient, notamment l'obtention de diagraphies de fractures, des essais systématiques d'injection à packer double, des essais d'interférence hydraulique et la surveillance à long terme des hauteurs piézométriques. Les essais d'interférence et la surveillance ont été effectués dans 90 intervalles d'essais isolés par l'installation de tubages à packers multiples dans chacun des trous de sondage. Des essais d'interférence hydraulique ont fourni des renseignements détaillés sur l'ouverture calculée pour une seule fracture et le coefficient d'emmagasinement équivalent de quatre grandes zones de fractures (supérieures à 50 m), et sur la diffusivité hydraulique verticale de la masse rocheuse à l'étude. Les diagraphies de fractures et les données obtenues lors des essais d'injection ont permis de produire une représentation tensorielle de la conductivité hydraulique de chacun des intervalles soumis aux essais. Les résultats des études détaillées de reconnaissance sont présentés et interprétés afin de fournir une description tridimensionnelle complète du système d'écoulement souterrain.

Un système d'écoulement par gravité existe au site à l'étude de Chalk River. Dans la roche, l'écoulement souterrain est essentiellement vertical et atteint une zone fracturée à faible hauteur piézométrique située entre 33 et 50 m de profondeur; la composante horizontale de l'écoulement est régie par la topographie de la surface. Un dyke imperméable de diabase et trois autres zones fracturées à grande perméabilité sont des caractéristiques hydrogéologiques importantes qui influent sur l'écoulement dans le site à l'étude. Les résultats des études de reconnaissance montrent également qu'il est essentiel de déterminer les propriétés géométriques et hydrauliques des grandes discontinuités structurales afin de connaître l'écoulement des liquides dans des roches fracturées.

Abstract

The hydraulic characteristics of a small ground-water flow system active in a block (200 m by 150 m by 50 m deep) of fractured monzonitic gneiss located at Chalk River, Ontario, have been determined from surface and borehole investigations. Surface investigations including air photo lineament analysis, ground and airborne geophysics and fracture mapping were used to define the local and regional fracture system, locate the study site, and direct the exploratory drilling program. Subsurface investigations were completed in 17 boreholes and included fracture logging, systematic straddle-packer injection testing, hydraulic interference testing, and long-term hydraulic head monitoring. The interference tests and monitoring were conducted in 90 packer-isolated test intervals created by installation of multiple-packer casings in each borehole. Hydraulic interference tests provided detailed information on the equivalent single-fracture aperture and storativity of four major (>50-m extent) fracture zones and the vertical hydraulic diffusivity of the rock mass of the study site. Fracture logs and injection test data were combined to generate a tensoral representation of hydraulic conductivity for each test interval. The results of the detailed investigations are presented and interpreted to provide a complete three-dimensional description of the ground-water flow system.

A gravity-controlled flow system occurs at the Chalk River study site. Ground-water flow in the rock is primarily vertical to a low hydraulic-head fracture zone at a depth of 33 to 50 m, with a horizontal component of flow determined by surface topography. An impermeable diabase dyke and three additional high-permeability fracture zones are important hydrogeologic features influencing flow at the study site. The results of the investigations also show that characterization of the geometric and hydraulic properties of large structural discontinuities is essential to understanding the flow of fluids in fractured rock.

Remerciements

L'auteur aimerait remercier ses assistants sur le terrain, C. Burge, B. Hannah, P. Kornelsen, B. Kueper, P. Lapcevic, C. Mangione, W. Stensrud et A. Vorauer, qui ont aidé à mener à bien les programmes d'essais hydrauliques, d'installation de tubages et de surveillance des hauteurs piézométriques. L'auteur tient à remercier particulièrement J.A. Smedley et R.A. Sweezey, responsables de la plupart des activités sur le terrain. Nous remercions également les ateliers des Laboratoires nucléaires de Chalk River pour leur appui technique, mécanique et électrique, ainsi que J.S.O. Lau, J.G. Bisson et F. Auger de la Commission géologique du Canada, qui ont effectué dans les trous de sondage les levés par image et les diagraphies par image acoustique.

Cette étude a été subventionnée par Énergie atomique du Canada Limitée à Pinawa (Manitoba), dans le cadre du Programme canadien de gestion des déchets de combustible nucléaire. A. Rouleau et K.S. Novakowski de l'Institut national de recherche en hydrologie, Environnement Canada, ont relu et commenté les versions préliminaires du présent rapport.

Détermination des propriétés hydrauliques d'un petit système d'écoulement souterrain dans un gneiss monzonitique fracturé

K.G. Raven

INTRODUCTION

Le présent rapport décrit les résultats des sondages d'exploration effectués sur le terrain des Laboratoires nucléaires de Chalk River (LNCR) en vue de déterminer l'hydrogéologie physique d'un petit système d'écoulement souterrain dans un gneiss monzonitique fracturé. Le travail décrit ici fait partie d'un grand projet de recherche subventionné par Énergie atomique du Canada Limitée (EACL) et par l'Institut national de recherche en hydrologie (INRH), Environnement Canada, en vue d'étudier l'écoulement souterrain dans une roche fracturée peu profonde. Le présent rapport couvre les travaux effectués entre 1981 et 1983. Certaines des activités effectuées en 1981 dans le cadre de ce projet ont également été décrites par Raven et Smedley (1982).

Les travaux effectués dans le cadre de l'étude de l'écoulement des eaux souterraines des LNCR comportent la collecte et l'interprétation de données géologiques, géophysiques et hydrogéologiques obtenues par des études en surface et des sondages, des études géomécaniques et des simulations numériques de l'écoulement des eaux souterraines. La méthode adoptée ici pour combiner ces diverses études, (Raven et coll., 1985) est illustrée à la figure 1. Les éléments centraux de la méthode comportent l'élaboration d'un modèle géologique-structural destiné à guider les recherches hydrogéologiques et un modèle mathématique de l'écoulement destiné à intégrer les données hydrogéologiques. Dans la figure 1, le présent rapport donne les résultats : 1) des études de détermination de la géométrie des fractures souterraines et de surface, 2) des essais de mesure de la conductivité hydraulique (K_{ij}), de l'emmagasinement spécifique (S_s) et des limites naturelles du débit et de la pression des eaux souterraines 3) de la surveillance des hauteurs piézométriques.

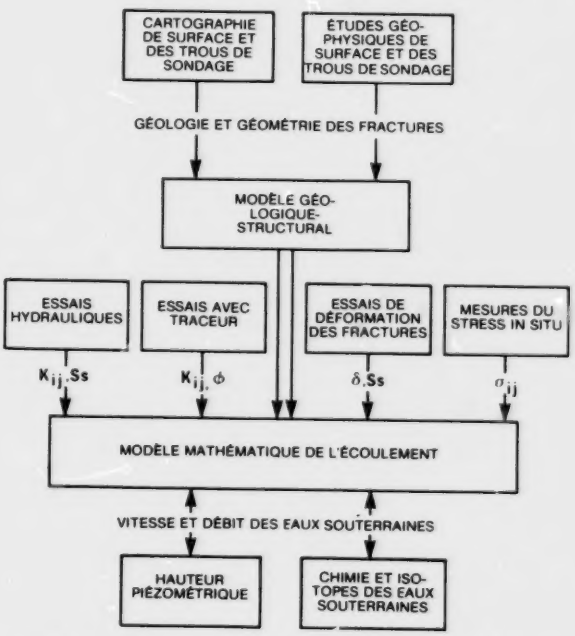


Figure 1. Approche pour étude des caractéristiques de l'écoulement souterrain dans une roche fracturée.

Les données présentées ici fournissent une description détaillée des propriétés d'écoulement des liquides et des limites hydrauliques d'un gneiss monzonitique fracturé mesurant 200 m par 150 m par 50 m de profondeur. On présente ici les tenseurs de conductivité hydraulique et les données concernant les hauteurs piézométriques à l'équilibre et transitoires (pompage d'essai à long terme) pour 90 intervalles d'essais isolés par des packers dans 17 trous de sondage. En plus d'éclairer la nature fondamentale des systèmes d'écoulement dans une roche fracturée, l'examen du site des LNCR permet d'obtenir une série relativement complète de données tridimentionnelles qui permet la comparaison et la validation des codes numériques d'écoulement souterrain à l'équilibre et dans des conditions transitoires.

DESCRIPTION DU SITE

Emplacement

Le site à l'étude est situé sur les terrains des Laboratoires nucléaires de Chalk River d'Énergie atomique du Canada Limitée, à 200 kilomètres au nord-ouest d'Ottawa, en Ontario, près de la municipalité de Chalk River (figure 2). Depuis 1978, l'Institut national de recherche en hydrologie a entrepris l'étude de plusieurs sites sur les terrains

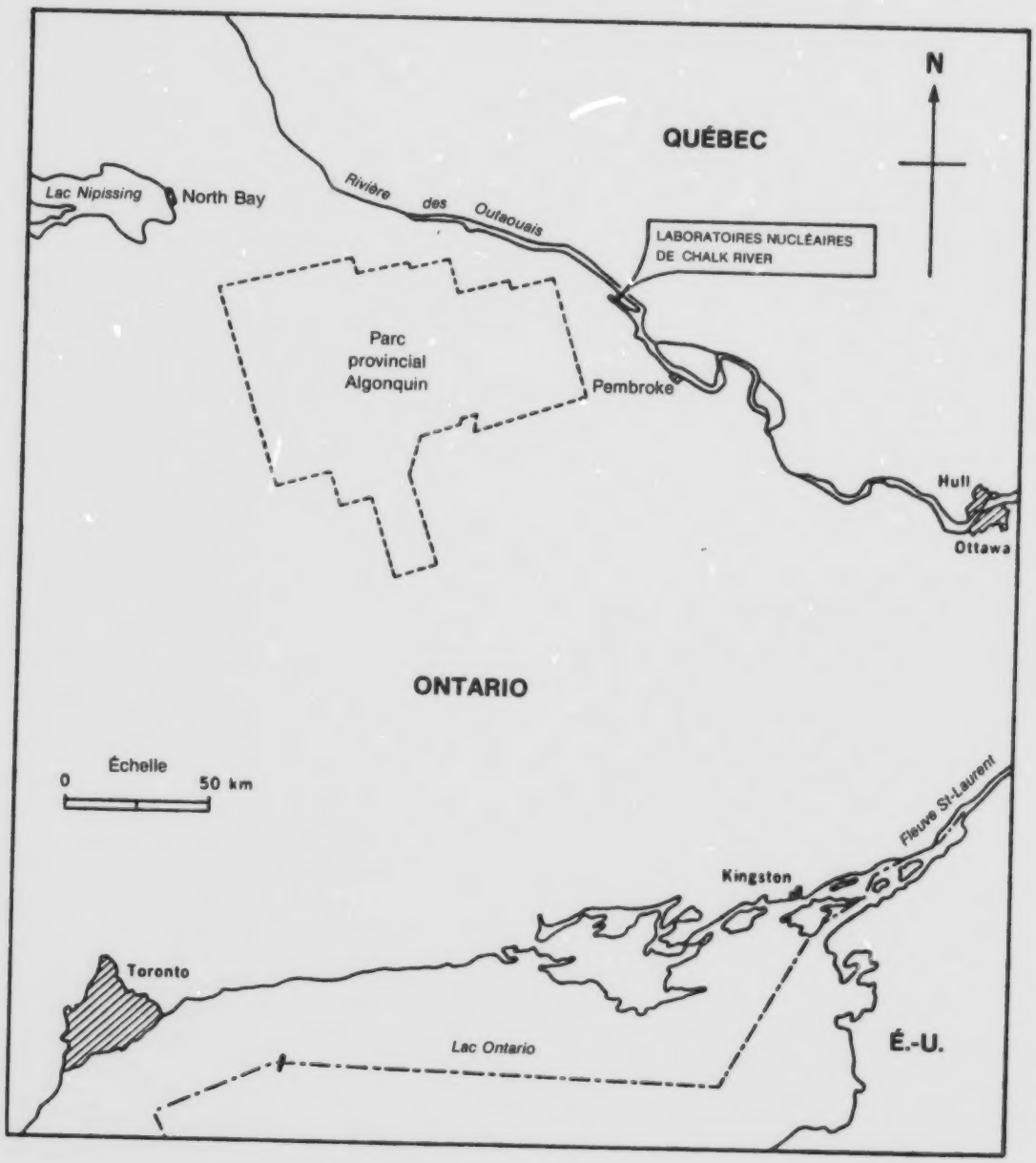


Figure 2. Emplacement des Laboratoires nucléaires de Chalk River (LNCR).

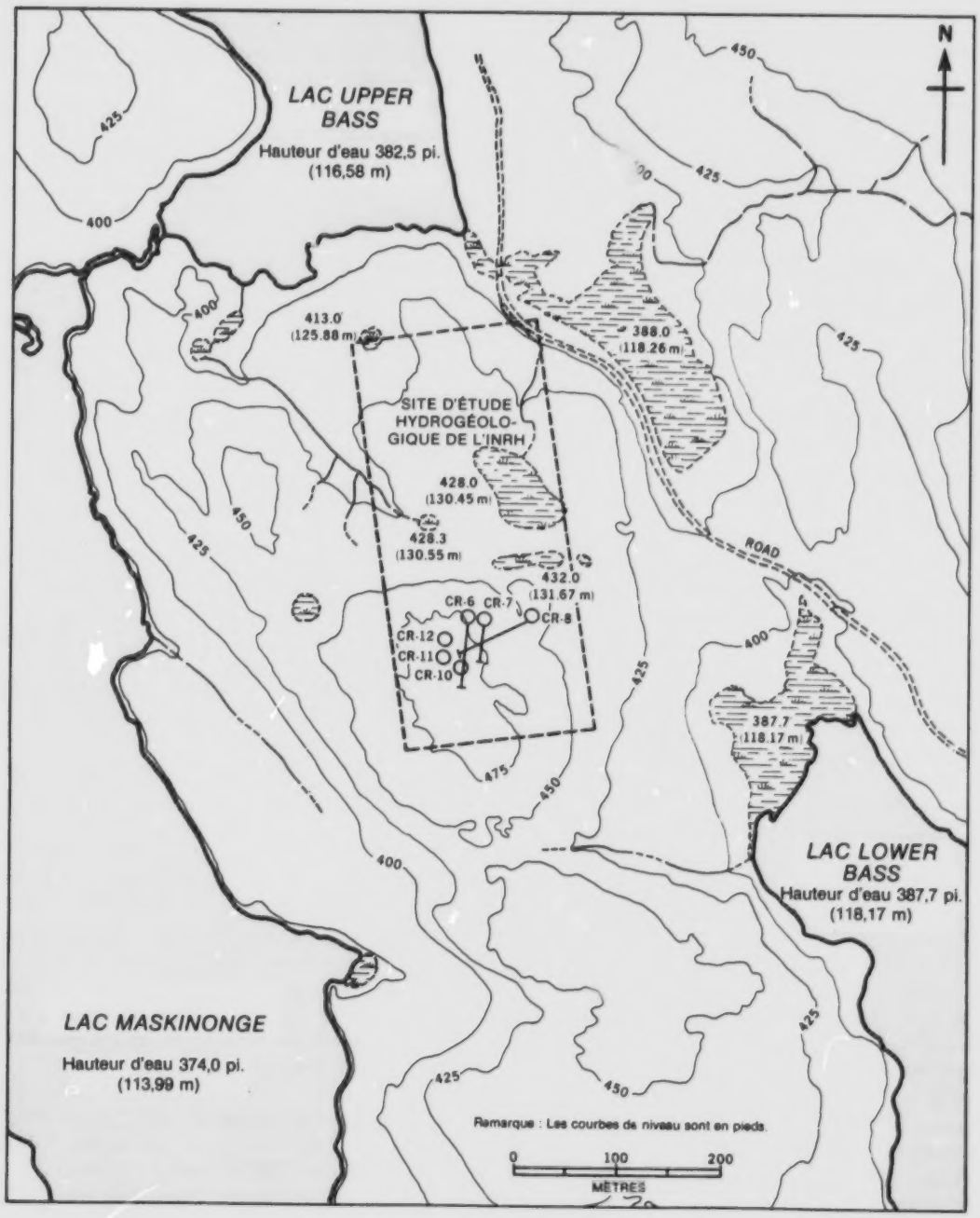


Figure 3. Emplacement des sites d'études hydrogéologiques de l'INRH. Le site d'étude de l'écoulement des eaux souterraines des LNCR est situé dans la moitié supérieure du rectangle délimité sur la carte.

des LNCR dans une zone bornée par les lacs Maskinongé, Upper Bass et Lower Bass. Le site de l'étude de l'écoulement des eaux souterraines des LNCR est situé du côté est du lac Maskinongé, dans la moitié supérieure de la zone rectangulaire délimitée sur la figure 3.

Géologie

Plusieurs chercheurs ont étudié en détail la géologie de la région de Chalk River (Lumbers 1974, Brown et Thivierge 1977, Brown et Rey 1984). La structure de cette région est complexe et sa lithologie, hétérogène. La région de Chalk River repose sur du roc de la province de Grenville du Bouclier canadien et est située dans le système de grabens Ottawa-Bonnechère, une importante zone de failles d'orientation nord-ouest qui traverse la région. La principale unité est une couche plissée de monzonite de quartz entourée d'un paragneiss et de nombreuses inclusions de métagabbro, de diabase et de pegmatite. Parmi les événements anciens de l'histoire ancienne tectonique-métamorphique, on note une déformation polyphasée culminant avec la formation d'importantes structures synformes-anticlinales renversées (Brown et Rey 1984) et d'un système de fractures extrêmement complexe. L'échelle des failles et des fractures de la région de Chalk River varie des centimètres aux kilomètres.

Le site étudié a été choisi à partir d'une analyse par photographies aériennes des arrangements structuraux et de levés électromagnétiques au sol et aériens (Dence et Scott 1980, Scott 1984, Sinha et Hayles 1984). Ces examens ont servi à localiser une zone de 200 m par 150 m dans laquelle le réseau des fractures était relativement uniforme et où les propriétés d'écoulement des liquides sous la surface étaient probablement uniformes. La figure 4 indique l'emplacement du site choisi par rapport aux zones de fractures et aux failles importantes et secondaires, d'après l'analyse par photographie aérienne des arrangements structuraux (Raven et Smedley 1982) et les levés électromagnétiques à très basses fréquences au sol et aériens (Dence et Scott 1980). La structure la plus remarquable dans la zone du site à l'étude est orientée en est-ouest, divise le site d'étude hydrogéologique de l'INRH et forme la limite sud du site d'étude de l'écoulement des eaux souterraines. Deux arrangements structuraux secondaires, repérés sur des photographies aériennes, sont orientés vers le nord-ouest et coupent les coins nord-ouest et sud-ouest du site étudié. Une zone conductrice secondaire identifiée par levé électromagnétique à très basse fréquence traverse le coin nord-ouest du site à l'étude. L'identification de ces structures à grande échelle qui recoupent ou limitent le site à l'étude est importante étant donné que ces structures régissent probablement le développement des systèmes d'écoulement d'eaux souterraines en agissant comme limites à pression constante à cause d'une perméabilité accrue ou comme limites imperméables résultant d'une perméabilité moindre.

La zone à l'étude est une masse rocheuse soulevée bien exposée, limitée sur trois et peut-être même quatre côtés par des failles ou d'importantes zones de fracture. La figure 5 illustre en détail la zone étudiée, ainsi que les altitudes et l'emplacement des trous de sondage, des affleurements rocheux et des nappes d'eau en surface. La roche en place affleure sur 20 à 30 % de la surface. Les affleurements locaux sont composés de gneiss monzonitique et granitique feuilletés comportant de nombreux dykes et petits filons de pegmatite. La gneissosité locale reflète les orientations générales, soit 315°/30° NE, bien que les affleurements dans la portion sud de la zone étudiée soient plutôt orientés en est-ouest, reflétant peut-être l'importante fracture structurale d'orientation est-ouest dont nous avons parlé précédemment. Une mince couche de sable pur à granulométrie moyenne, qui va en s'épaississant vers le nord-ouest pour atteindre 1 à 3 m, recouvre le reste du site (70 %).

PROGRAMME DE FORAGE

Entre 1981 et 1983, dix-sept trous de sondage (séries FS) ont été forés au site à l'étude. La profondeur moyenne des trous était de 45 à 50 m. En mai 1981, neuf trous de sondage d'un diamètre de 155 mm (FS 1 à 9) ont été forés par percussion à l'air ou au marteau-piqueur de fond. L'utilisation d'air pour les forages visait à empêcher la contamination des eaux des formations par les fluides de forage. Un tubage de chlorure de polyvinyle en surface a été jointoyé à environ 3 mètres dans la roche en place dans chaque trou de sondage foré par percussion. En mai 1982, un trou de sondage (FS-7) a été approfondi et cinq autres trous de sondage de 155 mm de diamètre (FS-10 à 14) ont été forés par percussion. En juin 1983, trois trous de sondage de grosseur HQ (FS-15 à 17) ont été forés au diamant en vue d'obtenir des renseignements détaillés sur la lithologie et des mesures des contraintes au-dessus de la carotte pour le site à l'étude.

Les trous de sondage ont été forés soit verticalement, soit obliquement. Les trous de sondage FS-7, 8, 9, 12, 13, 14 et 17 ont été forés de manière à traverser d'importantes discontinuités structurales. Les trous de sondage FS-2, 8, 9 et 11 ont été forés obliquement et perpendiculairement à l'orientation du principal ensemble de joints parallèles identifié à partir de la cartographie de surface (voir la section : «Cartographie des structures en surface»). L'espacement des trous de sondage est en moyenne de 30 m et leur localisation est indiquée sur la figure 5. Le

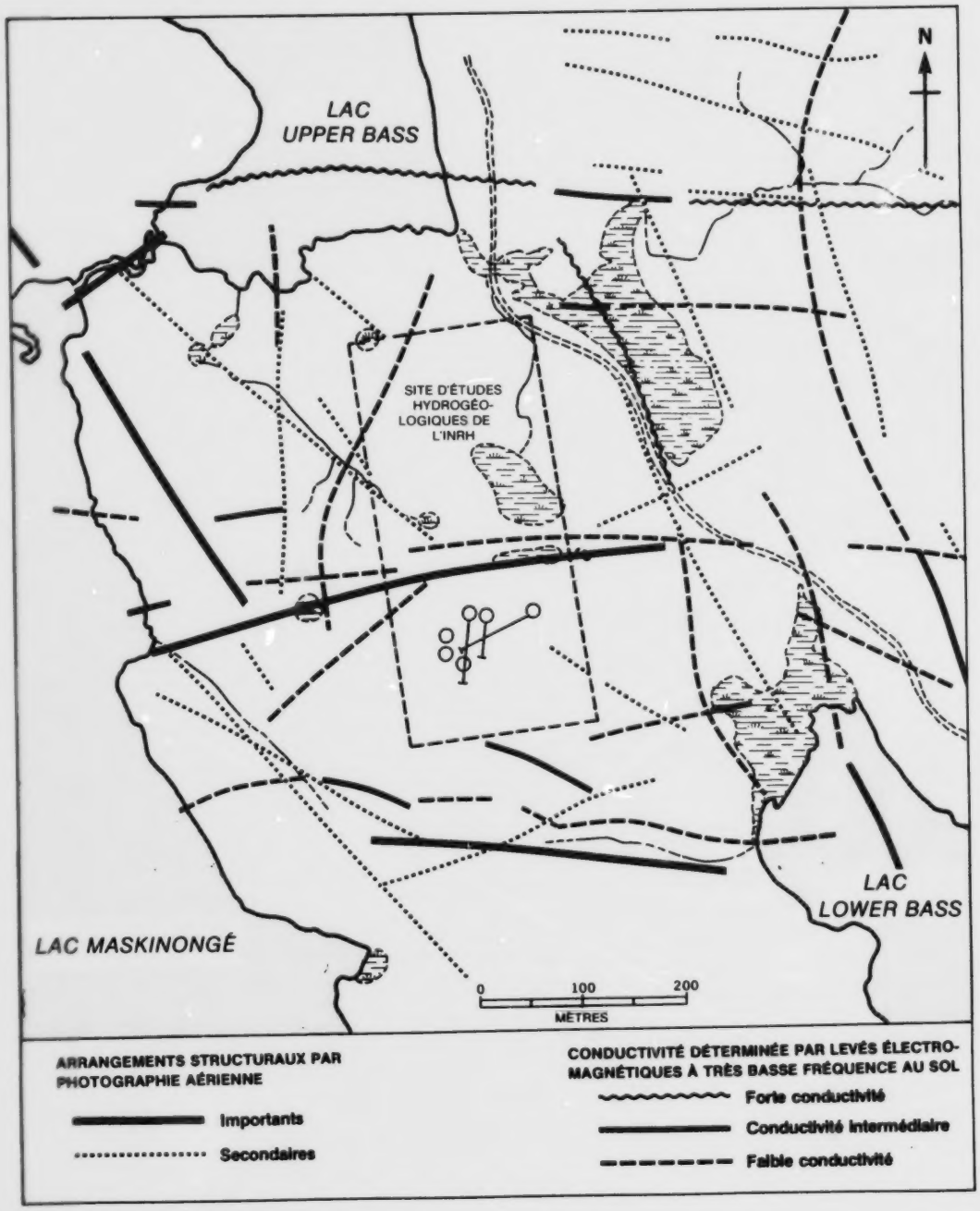


Figure 4. Emplacement du site de l'étude de l'écoulement souterrain des LNCR par rapport aux zones importantes et secondaires de failles et de fractures déterminées par analyse des arrangements structuraux par photographies aériennes et levés électromagnétiques à très basse fréquence au sol.

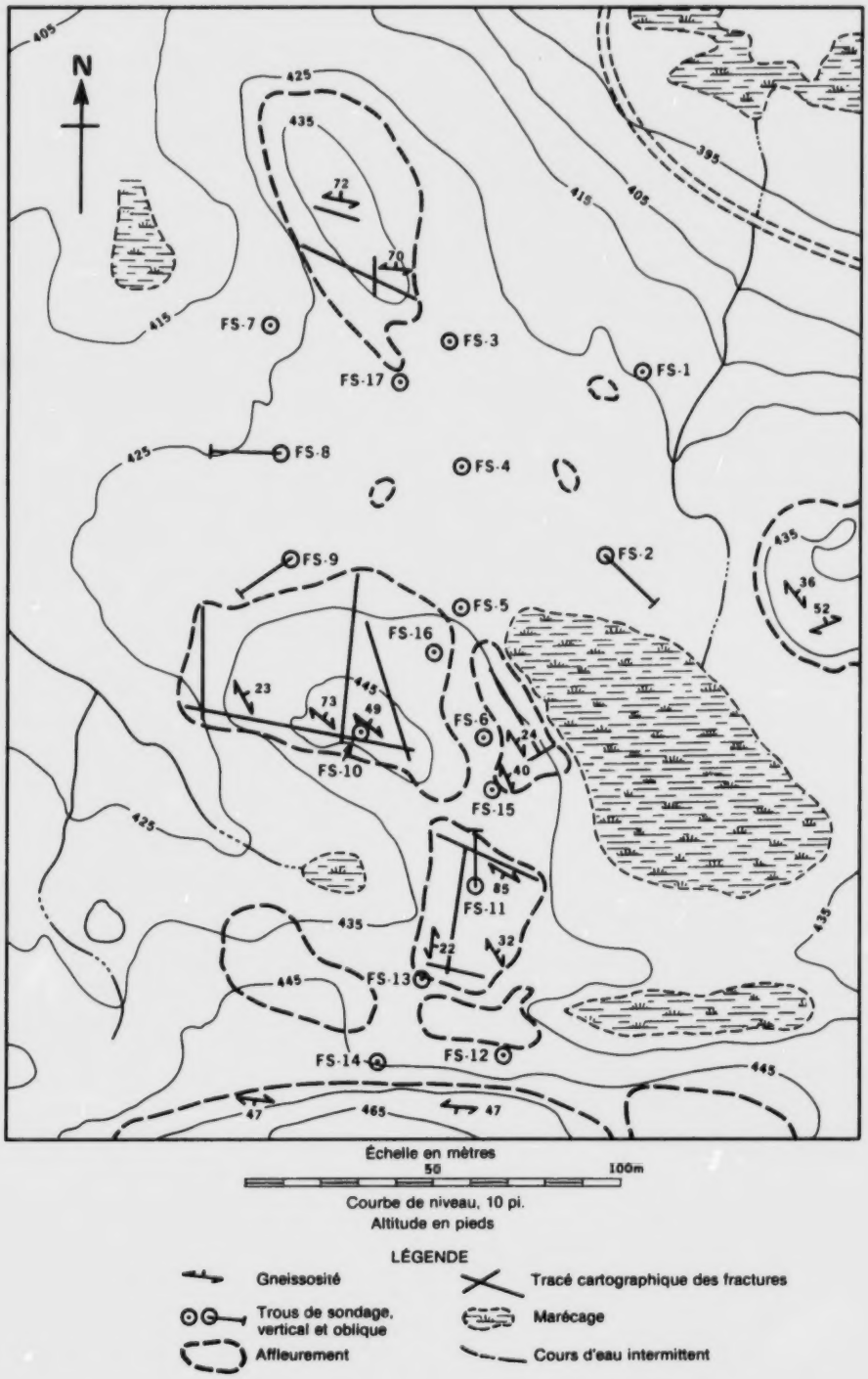


Figure 5. Carte du site de l'étude de l'écoulement des eaux souterraines des LNCR.

tableau 1 présente un résumé des orientations et des profondeurs des trous de sondage. Le tableau 2 indique l'altitude des bagues des trous de sondage et leur emplacement d'après les levés sur le terrain.

Tableau 1. Longueur et orientation des trous de sondage

Trou de sondage	Méthode de forage	Longueur (m S.S.T.*)	Orientation
FS-1	PA†	43.26	Verticale
FS-2	PA	43.60	130°/65°
FS-3	PA	41.50	Verticale
FS-4	PA	42.50	Verticale
FS-5	PA	41.60	Verticale
FS-6	PA	41.60	Verticale
FS-7	PA	74.15	Verticale
FS-8	PA	41.86	276°/70°
FS-9	PA	42.18	236°/70°
FS-10	PA	48.25	Verticale
FS-11	PA	43.53	0°/69°
FS-12	PA	43.50	Verticale
FS-13	PA	43.30	Verticale
FS-14	PA	42.13	Verticale
FS-15	FD‡	48.51	Verticale
FS-16	FD	50.34	Verticale
FS-17	FD	60.75	Verticale

* Sous le sommet du tubage.
† Forage par percussion à l'air – diamètre du trou : 155 mm.
‡ Forage au diamant – carotte de calibre HQ.

Tableau 2. Altitude et emplacement de la bague du trou de sondage

Trou de sondage	Altitude* de la bague (m au-dessus niveau mer)	Emplacement† de la bague	
		Ordonnée	Abscisse
FS-1	130.03	1114.54	4857.09
FS-2	131.82	1070.36	4885.72
FS-3	131.22	1144.52	4900.63
FS-4	132.48	1109.32	4911.95
FS-5	132.63	1077.28	4928.21
FS-6	134.54	1038.89	4935.39
FS-7	129.48	1164.09	4945.66
FS-8	130.61	1130.50	4958.48
FS-9	132.74	1102.26	4967.31
FS-10	137.34	1054.38	4964.52
FS-11	135.22	1002.62	4954.37
FS-12	135.01	958.29	4965.77
FS-13	134.78	984.74	4977.23
FS-14	135.90	970.55	4997.21
FS-15	134.23	1026.19	4936.05
FS-16	133.99	1067.12	4938.86
FS-17	133.00	1135.80	4916.34

* Altitude du point le plus bas au sommet du tubage de surface.
† L'emplacement est donné par rapport aux coordonnées de la station des LNCR situé à 22° en sens anti-horaire du nord vrai.

La lithologie de chaque trou de sondage a été reconstituée à partir de carottes récupérées et de fragments prélevés lors du forage par percussion. Ces diagraphies de la lithologie sont ajoutées à celles de l'hydrologie des fractures présentées à l'annexe A. D'après ces diagraphies, la lithologie souterraine du site est caractérisée par un gneiss de quartz-monzonite grenatifère comportant de nombreuses lentilles de pegmatite et de métagabbro. Un dyke de diabase de 5 à 10 m d'épaisseur occupe l'arrangement structural orienté est-ouest qui forme la limite sud du site à l'étude.

Avant les diagraphies géophysiques et les essais hydrauliques, chaque trou de sondage foré par percussion a été développé et nettoyé par jet d'air, pompage et brossage. Les trous de sondage forés au diamant ont été développés par pompage répété à l'aide d'une pompe électrique submersible.

DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS DU SYSTÈME DE FRACTURES

Les propriétés de l'écoulement des liquides dans une roche crystalline fracturée sont généralement régies par un système de fractures discontinues interreliées. Il est nécessaire de connaître en détail les propriétés hydrauliques et géométriques de ces systèmes de fractures discontinues afin de comprendre le mouvement des liquides et des solutés dans une roche plus fracturée. Les propriétés hydrauliques des fractures s'expriment généralement en ouverture hydraulique équivalente alors que les propriétés géométriques des fractures comportent l'orientation, l'espacement et les dimensions. Des données sur les propriétés hydrauliques et géométriques des fractures peuvent être intégrées pour décrire les propriétés de l'écoulement d'un liquide dans une masse rocheuse à l'aide de méthodes déterministes (Snow 1965) ou statistiques (Rouleau 1984). Dans le présent rapport (voir la section : «Détermination des tenseurs de conductivité hydraulique»), les données sur l'emplacement, l'orientation et l'ouverture des fractures ont été combinées à l'aide de l'approche déterministe de Snow (1965).

La géométrie du système de fractures du site à l'étude a été déterminée par des techniques de cartographie de surface et de diagraphie dans des trous de sondage.

Cartographie des fractures en surface

L'étude le long de lignes d'exploration a permis de cartographier le système de fractures dans les affleurements. L'emplacement de ces lignes d'exploration est indiqué à la figure 5. Ont été notés pour chaque fracture cartographiée dans un affleurement, l'emplacement, l'orientation, la longueur du tracé, l'indice de terminaison (Priest et Hudson 1981) et les caractéristiques de remplissage. Les fractures dont les longueurs de tracé étaient inférieures à 1.0 m n'ont pas été cartographiées.

Les données sur l'orientation des fractures ont été rapportées comme les pôles des plans des fractures et dessinées sur l'hémisphère sud d'un diagramme à aires équivalentes afin d'identifier des groupes de pôles ou des ensembles de fractures parallèles. Le schéma résultant, dont le biais d'orientation de l'échantillonnage a été corrigé à l'aide de la technique de Terzaghi (1965), est présenté à la figure 6. Ce diagramme indique l'existence de trois principaux ensembles de fractures parallèles. L'orientation moyenne des ensembles, déterminée par simple observation, est, par ordre décroissant de densité de fracture, 105°/75° S, 235°/70° N et 150°/90°. L'importance relative de ces ensembles de fractures varie partiellement dans les affleurements de la zone à l'étude, ce qui indique des caractéristiques statistiquement non homogènes à l'échelle du site étudié (environ 150 à 200 m). Le plus important ensemble de fractures parallèles, orienté 105°/75° S, est plus évident dans les affleurements les plus au sud près du plus grand dyke de diabase est-ouest dont nous avons parlé précédemment, et est représenté par un ensemble secondaire dans l'affleurement le plus au nord. Inversement, l'ensemble de fractures orienté 235°/70° N apparaît plus clairement dans l'affleurement au nord et est de moins en moins présent en direction du sud. L'ensemble de fractures parallèles orienté 150°/90° est représenté d'une manière relativement uniforme dans tous les affleurements.

Diagraphies de fractures dans les trous de sondage

La Commission géologique du Canada (Lau et coll., 1984) a effectué des levés par image (Lau 1980) et des diagraphies par image acoustique (Zemanek et coll., 1969) afin de cartographier le système souterrain de fractures que traverse chaque trou de sondage. Ces deux techniques ont permis d'identifier l'orientation, l'emplacement et les propriétés des fractures et filons. Tous les trous de sondage ont été examinés par image. Une diagraphie acoustique a été effectuée dans tous les trous de sondage à l'exception des trous FS-15 et 16. Les résultats de ces études sont données dans les diagraphies de fractures de l'annexe A. Les fractures et veines identifiées par image ont été tracées sur les diagraphies de fractures comme des lignes droites reliant les points élevés et bas de la trace elliptique de la paroi du trou de sondage. Les diagraphies acoustiques de fractures et de veines ont été représentées schématiquement sur les diagraphies de fractures telles que celles-ci apparaissent sur les photographies à 360° de la paroi des trous de sondage, à des intervalles de 0.5 m.

Les données concernant l'orientation des fractures traversant chacun des trous de sondage ont été combinées et tracées en contours de zone selon la méthode décrite pour l'analyse des fractures de surface. Les figures 7 et 8 illustrent les diagrammes polaires pour les fractures identifiées respectivement par image et acoustiquement. Les données sur l'orientation des fractures mesurées dans le dyke de diabase extrêmement fracturé que traverse la moitié supérieure du trou de sondage FS-12 et tout le trou de sondage FS-14 ont été exclues des deux figures; en effet, ces données ne sont pas fiables étant donné le caractère peu marqué de ces fractures. Le diagramme des données acoustiques (figure 8) comporte des données sur l'orientation des fractures pour les trous de sondage FS-15 et 16, obtenues par image.

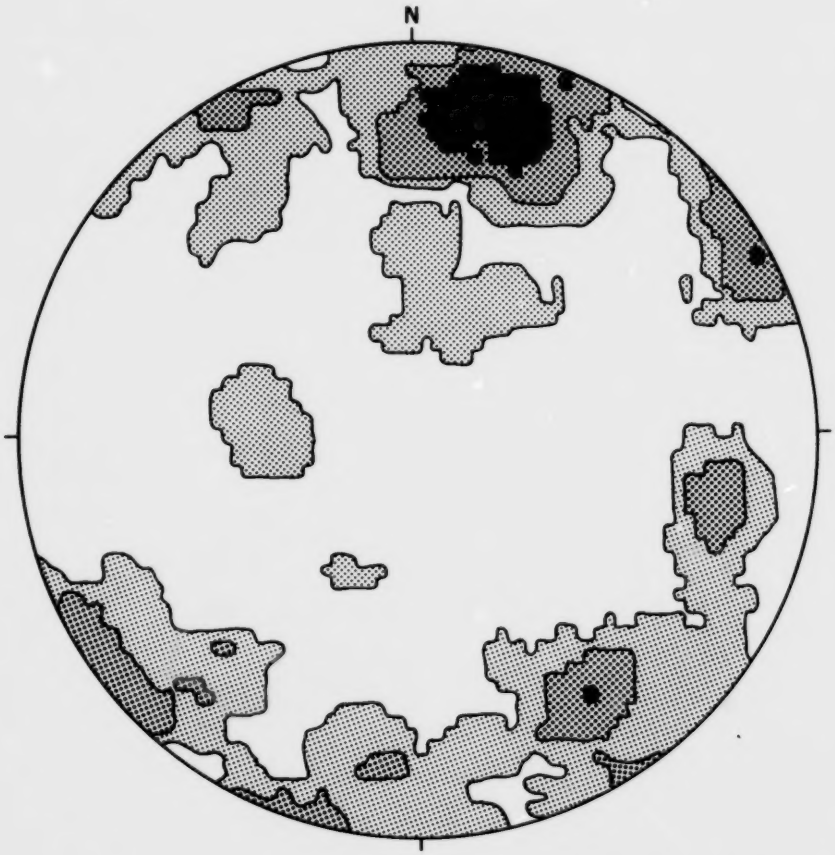
Les diagrammes polaires obtenus à partir des deux méthodes de cartographie des fractures des trous de sondage indiquent la présence d'ensembles semblables de fractures souterraines. L'orientation moyenne des principaux ensembles de fractures souterraines et en surface est donnée au tableau 3, par ordre d'importance relative décroissant de gauche à droite. À l'échelle du site, la cartographie des fractures de surface a permis d'identifier tous les ensembles de fractures parallèles à forte inclinaison. L'importance relative des deux ensembles principaux de fractures parallèles était cependant inversée sur les cartes de surface et les cartes souterraines. Cette inversion reflète la variation spatiale de l'orientation des fractures et le biais dû aux effleurements vers le sud et le centre du site étudié.

La variabilité spatiale des fractures souterraines a également été examinée en regroupant les données sur l'orientation des fractures en trois zones : nord, comportant des données des trous de sondage FS-1, 2, 3, 4, 7 et 17;

Tableau 3. Orientation moyenne des principaux ensembles de fractures parallèles identifiés par cartographie des fractures de surface et dans les trous de sondage

Méthode de détection des fractures	Orientation moyenne des principaux ensembles de fractures parallèles			
Cartographie des fractures de surface	105°/70° S	235°/70° N	150°/90°	–
Images acoustiques des trous de sondage	250°/70° N	105°/75° S	145°/90°	Subhorizontale
Image des trous de sondage	250°/70° N	100°/65° S	145°/90°	Subhorizontale

centrale, comportant des données des trous de sondage FS-5, 6, 8, 9, 10 et 16, et sud, comportant des données des trous de sondage FS-11, 12, 13 et 15. Aux fins de cette comparaison, nous avons choisi les données sur l'orientation des fractures obtenues acoustiquement. Cette source de données a été préférée aux données obtenues par image, vu la supériorité des méthodes acoustiques pour identifier des fractures dans des couches mafiques importantes sur le plan hydrogéologique. Les diagrammes polaires et la liste des principaux ensembles de fractures parallèles et



TRACÉ DES PÔLES REPRÉSENTANT LES PLANS DES FRACTURES, PROJECTION À AIRES ÉQUIVALENTES (HÉMISPHÈRE SUD)

Délimitation de la densité des pôles (% du total des pôles)	
0 - 1	
1 - 3	
3 - 6	
6 - 9	
9 - 12.4	
Nombre total de pôles = 264	

Figure 6. Contours des ensembles de pôles représentant les fractures mesurées dans les affleurements du site de l'étude sur l'écoulement des eaux souterraines des LNCR.

souterrains sont présentés à la figure 9 et au tableau 4 pour chacune des trois zones du site à l'étude. La figure 9 illustre de plus l'emplacement des trois principales discontinuités structurales qui traversent le site à l'étude. Les données concernant l'orientation des fractures présentées à la figure 9 indiquent un accroissement relatif du nord au sud de l'importance de l'ensemble des fractures parallèles orientées entre 240° et 260°/75° N et une diminution relative de l'importance de l'ensemble de fractures parallèles orientées à 150°/90°. L'ensemble de fractures parallèles orientées

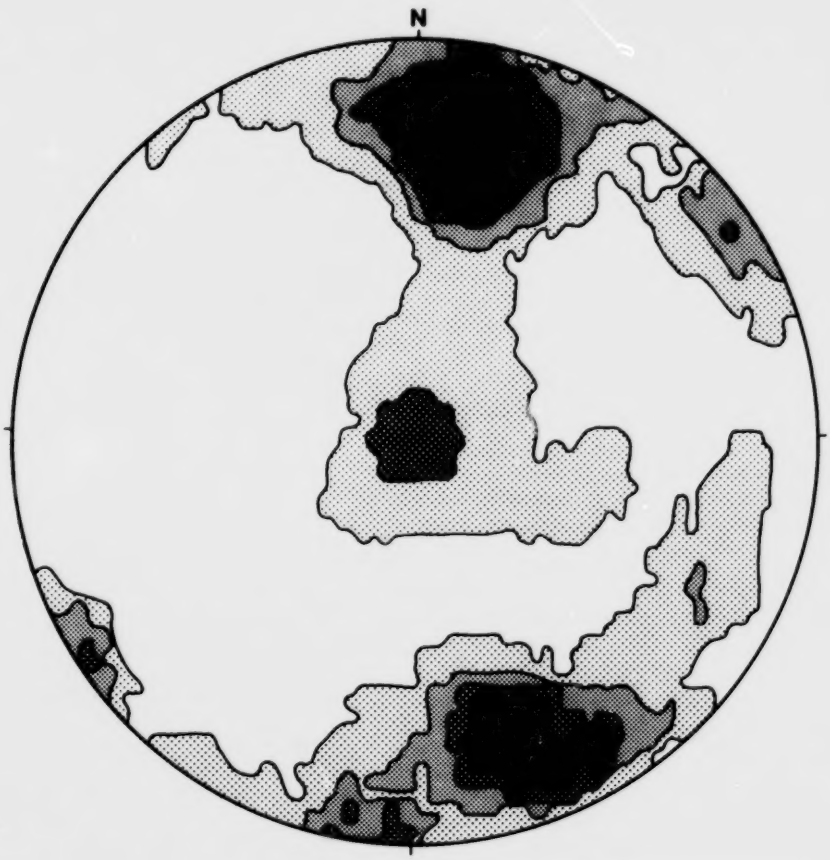
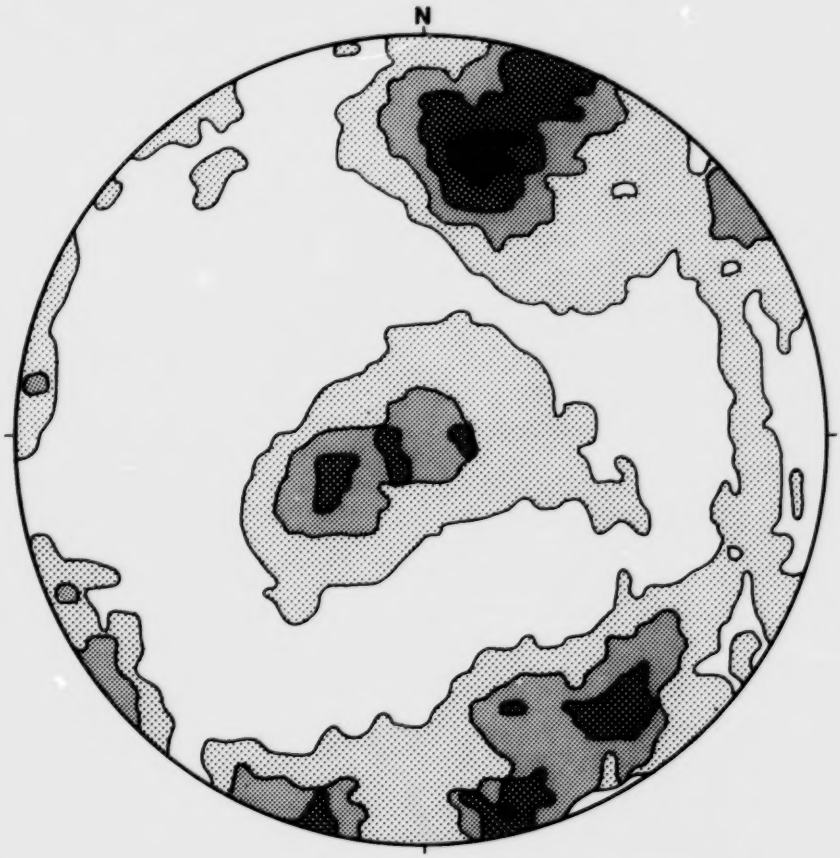


Figure 7. Contours des ensembles de pôles représentant les fractures observées par image dans les trous de sondage de la série FS.

à 105°/80° S présente une expression relativement uniforme dans les trois zones. Les importances relatives de l'ensemble de fractures parallèles souterraines reflètent, entre autres facteurs géologiques, la proximité des trous de sondage de formations structurales importantes. La variation spatiale observée dans les fractures suggère que les propriétés d'écoulement des liquides dans la masse rocheuse présentera également une variabilité ou hétérogénéité spatiale significative. Étant donné que cette variabilité des propriétés de l'écoulement des liquides sera, en partie,



TRACÉ DES PÔLES REPRÉSENTANT LES PLANS DES FRACTURES, PROJECTION À AIRES ÉQUIVALENTES (HÉMISPHÈRE SUD)

Délimitation de la densité des pôles (% du total des pôles)	
0-1	
1-2	
2-3	
3-4	
4-6.8	
Nombre total de pôles = 1609	

Figure 8. Contours des ensembles de pôles représentant les fractures enregistrées par image acoustique dans les trous de sondage de la série FS.

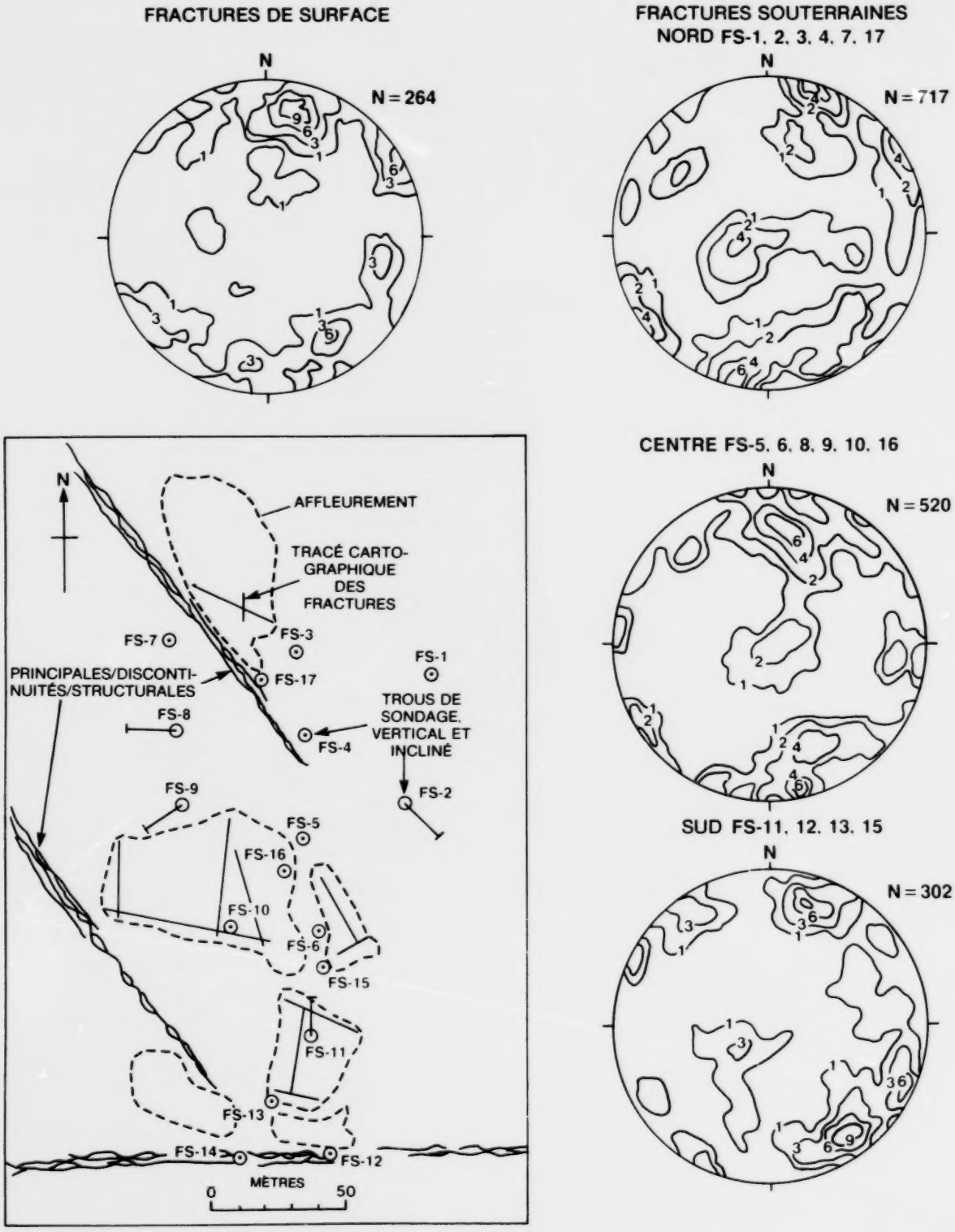


Figure 9. Carte du site et données concernant l'orientation des fractures déterminées par cartographie de surface et des trous de sondage. Des tracés stéréographiques délimitent des ensembles de pôles représentant les fractures sur 1 % de la surface totale de projections à aires équivalentes (hémisphère sud).

Tableau 4. Orientation moyenne des principaux ensembles de fractures parallèles souterraines dans trois zones

Zone et trous de sondage	Orientation moyenne des principaux ensembles de fractures parallèles			
Nord				
FS-1,2,3,4,7,17	105°/80° S	Subhorizontale	145°/90°	255°/80° N
Centre				Subhorizontale
FS-5,6,8,9,10,16	105°/80° S	260°/80° N	250°/65° N	150°/90°
Sud				
FS-11,12,13,15	240°/75° N	105°/75° S	200°/80° N	Subhorizontale

reliée à la présence ou à l'absence de discontinuités structurales importantes, il est nécessaire de définir ces discontinuités pour caractériser une masse rocheuse aux fins de l'évaluation hydrogéologique détaillée.

INSTALLATION DES TUBAGES DANS DES TROUS DE SONDAGE

Chaque trou de sondage a été pourvu d'un tubage contenant de nombreux packers et tuyaux de refoulement afin de permettre l'accès à long terme à des intervalles d'essai isolés sur le plan hydraulique. Le système de tubage conçu par l'INRH, décrit par Raven et Smedley (1982) et illustré schématiquement à la figure 10, permet d'utiliser simultanément et en continu 5 à 7 intervalles d'essai isolés par des packers dans chacun des trous de sondage. Chacun des intervalles d'essai est relié à la surface par des tuyaux de refoulement de chlorure de polyvinyle de 25 mm de diamètre ou de tubes de nylon de 13 mm de diamètre. Dans chacun des trous de sondage, des packers renforcés et gonflés à l'air servent de joints hydrauliques. Chacun des packers est gonflé d'air à l'aide d'un tuyau d'inflation individuel. La surveillance en surface des pressions d'inflation des packers permet de s'assurer que les packers sont toujours bien gonflés et que les joints entre les intervalles d'essai sont étanches. L'emplacement des packers dans des trous de sondage est illustré sur les diagraphies de fractures (Annexe A).

Avant l'installation des tubages, tous les packers et les bouts de tubage scellés à l'aide de joints toriques ont fait l'objet de tests de pression afin de vérifier la qualité du système de tubage. Les tubages ont été installés dans chacun des trous de forage peu après la fin du forage, des levés géophysiques et des essais d'injection à packer double. Le tubage a été installé en août 1981 dans les trous de sondage FS-1 à 9, dans les trous de sondage FS-7 et FS-10 à 14 en juillet 1982 et dans les trous de sondage FS-15 à 17 en août 1983. Au total, 78 packers ont été installés dans les 17 trous de sondage du site à l'étude. En février 1985, seulement deux des 78 packers, FS 2-5 et FS 8-4, s'étaient dégonflés.

Quatre-vingt-dix intervalles d'essai dans 17 trous de sondage fournissent les données nécessaires pour l'étude du système d'écoulement des eaux souterraines des LNCR. La profondeur, la longueur et le volume annulaire de ces intervalles d'essai sont donnés au tableau 5; les longueurs des intervalles varient de 3 à 13 m.

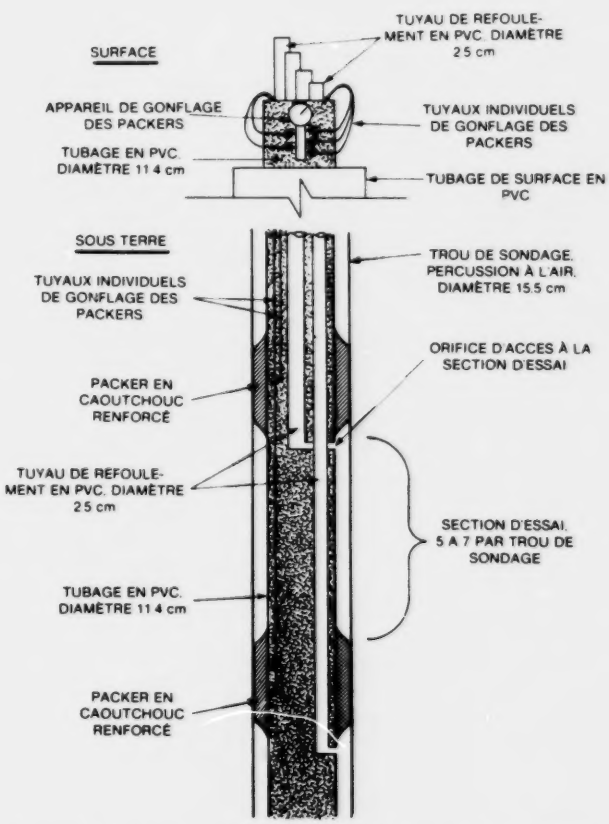


Figure 10. Schéma illustrant un tubage à packers et tuyaux de refoulement multiples installés dans chacun des trous de sondage de la série FS.

Les tubages à packers et tuyaux de refoulement multiples ont servi à des essais de traçage et d'interférence hydraulique verticale et latérale, des échantillonnages d'eaux souterraines et à la surveillance à long terme des hauteurs piézométriques. Ce système de tubage permet d'obtenir, pour ce type d'étude sur le terrain, des données plus précises que ne le permettent normalement des trous de sondage ouverts, parce qu'il permet de réduire 1) l'écoulement naturel des eaux souterraines entre les trous de sondage 2) les effets de volume, de mélange et d'emmagasinement des intervalles. Une série d'outils de petit diamètre a également été mise au point (Raven et Smedley, 1982) pour les essais dans ce système à tubage.

Tableau 5. Mesures des intervalles d'essais FS

Intervalle	Profondeur de l'intervalle (m S.S.T*)	Longueur de l'intervalle (m)	Volume de l'intervalle (L)
FS 1-1	37.19-43.26	6.07	47.2
FS 1-2	26.81-36.45	9.64	74.7
FS 1-3	16.44-26.06	9.62	74.6
FS 1-4	7.59-15.69	8.10	62.8
FS 1-5	2.03- 6.84	4.81	53.3
FS 2-1	34.31-43.60	9.29	72.1
FS 2-2	25.34-33.53	8.19	63.5
FS 2-3	16.58-24.63	8.05	62.4
FS 2-4	9.25-15.81	6.56	50.9
FS 2-5	3.05- 8.47	5.42	102.1
FS 3-1	32.10-41.50	9.40	72.9
FS 3-2	23.25-31.33	8.08	62.7
FS 3-3	15.91-22.47	6.56	50.9
FS 3-4	7.97-15.14	7.17	55.6
FS 3-5	4.59- 7.18	2.59	20.0
FS 3-6	3.05- 3.82	0.81	38.7
FS 4-1	33.00-42.50	9.50	134.0
FS 4-2	22.60-32.18	9.58	74.3
FS 4-3	15.15-21.81	6.67	51.7
FS 4-4	7.93-14.51	6.58	51.0
FS 4-5	5.18- 7.15	1.97	15.3
FS 4-6	3.05- 4.40	1.35	34.7
FS 5-1	32.25-41.60	9.35	72.5
FS 5-2	21.85-31.47	9.62	74.6
FS 5-3	12.97-21.09	8.12	63.0
FS 5-4	7.16-12.22	5.06	39.2
FS 5-5	2.06- 6.40	4.34	49.8
FS 6-1	30.70-41.60	10.90	84.5
FS 6-2	21.83-29.92	8.09	62.7
FS 6-3	16.94-21.06	4.12	31.9
FS 6-4	8.07-16.17	8.10	62.8
FS 6-5	2.03- 7.32	5.29	41.0
FS 7-1	61.65-74.15	12.50	96.9
FS 7-2	52.79-60.95	8.16	63.3
FS 7-3	44.82-52.10	7.28	56.5
FS 7-4	30.78-44.12	13.34	103.5
FS 7-5	18.85-30.07	11.22	87.0
FS 7-6	7.89-18.17	10.28	79.7
FS 7-7	3.05- 7.16	4.11	64.3
FS 8-1	34.11-41.86	7.75	60.1
FS 8-2	23.73-33.33	9.60	74.5
FS 8-3	14.86-22.95	8.09	62.8
FS 8-4	4.16-14.11	9.95	77.2
FS 8-5	3.05- 3.42	0.37	56.3
FS 9-1	35.84-42.18	6.34	49.2
FS 9-2	28.50-33.03	6.53	50.6
FS 9-3	19.64-27.72	8.08	62.6
FS 9-4	9.25-18.90	9.65	74.9
FS 9-5	4.31- 8.49	4.18	32.4
FS 9-6	3.05- 3.55	0.50	57.2
FS 10-1	39.31-48.75	9.44	73.2
FS 10-2	28.92-38.59	9.67	75.0
FS 10-3	23.08-28.19	5.11	39.6
FS 10-4	15.13-22.37	7.24	56.2
FS 10-5	9.28-14.44	5.16	40.0
FS 10-6	1.50- 8.62	7.12	16.4
FS 11-1	37.13-43.53	6.40	49.6
FS 11-2	28.29-36.45	8.16	63.3
FS 11-3	20.92-27.56	6.64	51.5
FS 11-4	12.93-20.20	7.27	56.4
FS 11-5	4.09-12.25	8.16	63.3
FS 11-6	2.00- 3.38	1.38	36.6
FS 12-1	35.61-43.50	7.89	61.2
FS 12-2	27.66-34.93	7.27	56.4
FS 12-3	19.71-26.95	7.24	56.2
FS 12-4	7.76-19.01	11.25	87.3
FS 12-5	3.50- 7.07	3.57	89.3
FS 13-1	35.33-43.30	7.97	61.8
FS 13-2	29.54-34.67	5.13	39.8
FS 13-3	22.21-28.86	6.65	51.6
FS 13-4	14.86-21.51	6.65	51.6
FS 13-5	7.48-14.13	6.65	51.6
FS 13-6	1.50- 6.80	5.30	57.3
FS 14-1	38.10-42.13	4.03	31.3
FS 14-2	30.77-37.41	6.64	51.5
FS 14-3	18.88-30.10	11.22	87.0
FS 14-4	7.86-18.18	10.32	80.0
FS 14-5	5.80- 7.15	1.35	133.7
FS 15-1	45.49-48.51	3.02	13.3
FS 15-2	38.17-44.84	6.67	29.3
FS 15-3	30.85-37.49	6.64	29.2
FS 15-4	15.95-30.10	14.15	62.1
FS 15-5	0.70-15.26	14.56	53.8
FS 16-1	47.90-50.34	2.44	10.7
FS 16-2	37.50-47.21	9.71	42.6
FS 16-3	30.20-36.83	6.63	29.1
FS 16-4	16.39-29.49	13.10	57.5
FS 16-5	0.52-15.70	15.18	49.2
FS 17-1	51.78-60.75	8.97	39.4
FS 17-2	40.45-51.12	10.67	46.8
FS 17-3	27.01-39.79	12.78	56.1
FS 17-4	19.70-26.37	6.67	29.3
FS 17-5	0.69-19.05	18.36	63.9

Tableau 5 (suite)

* Sous le sommet du tubage

SCHÉMA DE L'ÉQUIPEMENT EN SURFACE POUR LES ESSAIS D'INJECTION ET LES POMPAGES D'ESSAI

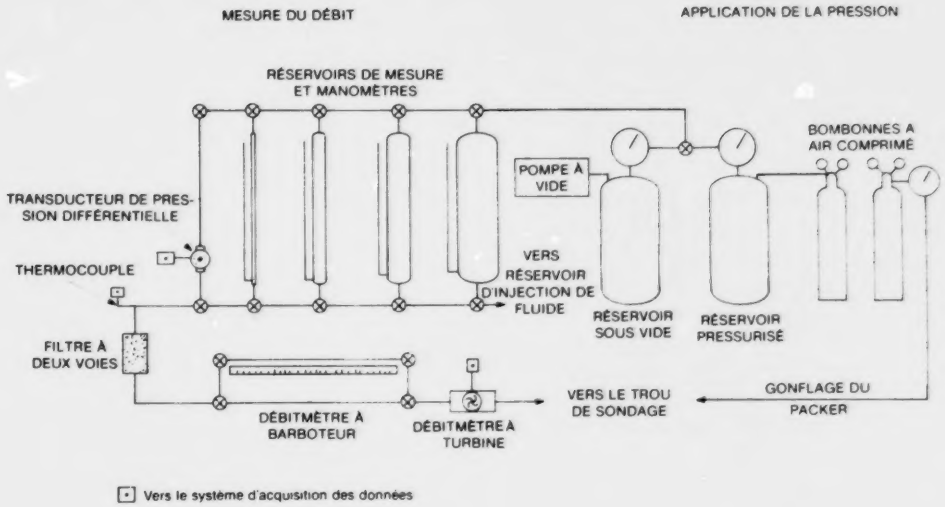


Figure 11. Schéma de l'équipement en surface utilisé pour les essais d'injection à packer double et les pompages d'essai à tubage à packer.

ESSAIS D'INJECTION À PACKER DOUBLE

Méthode

Un programme détaillé d'essais d'injection à packer double a été effectué en vue de mesurer les propriétés hydrauliques au voisinage de chacun des trous de sondage. Des packers doubles gonflés à l'air ont été utilisés pour isoler systématiquement des intervalles d'essai de 1.5 à 2.0 m de longueur. Plus de 350 essais d'injection ont été effectués dans les 17 trous de sondage.

Lors d'un essai d'injection, le débit à l'équilibre (Q) dans un intervalle d'essai a été mesuré pour une pression d'injection ou hauteur piézométrique (ΔH) imposée, supérieure aux conditions ambiantes ou d'équilibre. Une seule hauteur d'injection a été utilisée pour chacun des tests. Des essais d'injection par étape ou à débits multiples n'ont pas été effectués dans le cadre du programme d'injection.

Les essais d'injection à packer double nécessitent l'assemblage d'équipement en surface et dans le trou de sondage. Les figures 11 et 12 illustrent l'équipement utilisé en surface et dans les trous de sondage au site d'étude des écoulements souterrains des LNCR. Des descriptions détaillées de cet équipement et des méthodes d'essai sont données par Raven (1980), et Raven et Smedley (1982).

SCHÉMA DE L'ÉQUIPEMENT POUR LES ESSAIS D'INJECTION ET LES POMPAGES D'ESSAI

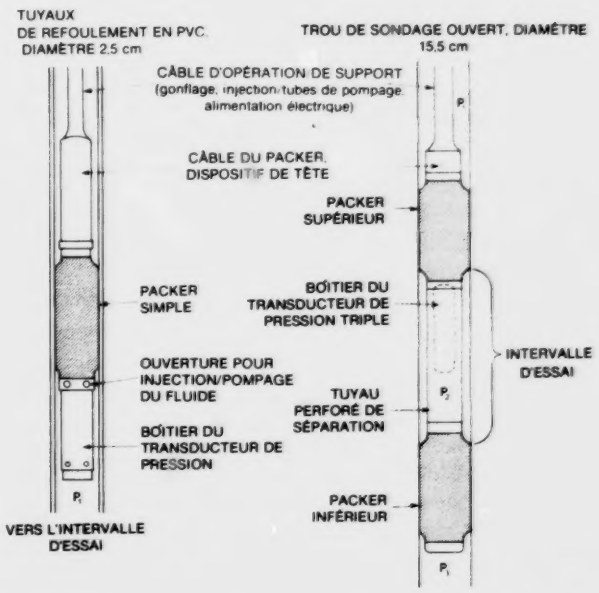


Figure 12. Schéma de l'équipement souterrain utilisé pour les essais d'injection à packer double et les pompages d'essai dans des trous de sondage à tubage à packer.

L'équipement de surface et dans les trous de sondage utilisé pour effectuer des pompages d'essai dans des trous de sondage équipés de tubage à packer et tuyaux de refoulement multiples est également illustré aux figures 11 et 12.

Durant chacun des essais, la pression d'injection du fluide a été surveillée en continu à l'aide de transducteurs de pression de fond et maintenue constante grâce à l'utilisation de grands réservoirs de pression en surface. Un transducteur triple (figure 12), a été fréquemment utilisé pour surveiller la pression d'injection dans l'intervalle d'essai et les pressions au-dessus et au-dessous du packer. Le contrôle des pressions au-dessus et au-dessous de l'intervalle d'essai permet la détection d'une fuite de fluide d'injection autour des joints des packers. La non-linéarité, la fidélité et la sensibilité des transducteurs de pression de fond et l'équipement d'enregistrement en surface donnent un système sensible à des différences de 0.01 m de hauteur piézométrique. Des hauteurs d'injection de 5 à 25 m ont été utilisées durant la plupart des essais.

Les débits d'injection ont été mesurés à la surface à l'aide d'une série de réservoirs de diamètres différents à hauteur constante (Raven, 1980), un débitmètre à turbine et un débitmètre à barboteur (Gale et coll., 1979). Ce système de mesure des débits est efficace pour une plage de mesure d'environ 6 ordres de grandeur. La plus faible mesure fiable de débit était d'environ 4×10^{-10} $m^3 \cdot s^{-1}$. Cette limite inférieure a été déterminée par des effets d'expansion et de compressibilité thermiques du fluide d'injection et de l'équipement (tubes flexibles, packers, etc.). La limite supérieure, d'environ $1.0 \times 10^{-4} m^3 \cdot s^{-1}$, a été déterminée à partir des caractéristiques de perte de hauteur par friction des tubes d'injection et de l'exigence minimale de hauteur d'injection au fond du trou de 0.10 m.

Les périodes d'injection de fluide pour chacun des essais ont varié de 30 à 120 min. Durant ces périodes, les mesures du débit, de la pression d'injection et de la température du fluide ont été enregistrées sous forme digitale et sous forme graphique à l'aide d'enregistreurs graphiques à plusieurs stylets.

Avant de procéder aux essais dans chacun des trous de sondage, toute fuite potentielle, ainsi que la précision de la mesure du débit du sondeur à packer double, ont été vérifiées en surface dans un tuyau de plastique de 6 m de longueur.

Résultats

Des essais ont été effectués systématiquement dans chacun des trous de sondage depuis la nappe phréatique statique jusqu'au fond du trou à des intervalles se chevauchant de 0.05 à 0.27 m. Les débits (Q) et les hauteurs d'injection (ΔH) mesurés, exprimés par le rapport $Q/\Delta H$, reflètent les propriétés conductrices de l'intervalle d'essai. Le débit par unité de hauteur d'injection ($Q/\Delta H$) pour le site à l'essai, mesuré pour des longueurs d'intervalles d'essai de 1.5 à 2.0 m, varie de $5.0 \times 10^{-4} m^2 \cdot s^{-1}$ à moins de $1.5 \times 10^{-11} m^2 \cdot s^{-1}$.

On a tracé la courbe du débit par unité de hauteur d'injection sur les diagraphies des résumés des fractures pour chacun des trous de sondage (Annexe A) et les données de chacun des trous de sondage sont présentées en tableau à l'Annexe B.

Il peut être approprié d'utiliser deux modèles conceptuels d'écoulement afin d'analyser les données des essais d'injection. Si l'on suppose que l'écoulement est distribué également à travers un milieu poreux équivalent à la section de roche fracturée à l'étude, une conductivité hydraulique équivalente de la masse rocheuse (K_{erm}) peut être calculée (Hvorslev, 1951) :

$$K_{erm} = \frac{Q}{\Delta H 2\pi L} \ln (r_b/r_w) \qquad (1)$$

où L est la longueur de l'intervalle d'essai, r_b est le rayon jusqu'à la limite de pression constante et r_w est le rayon du trou de sondage.

Inversement, si l'on suppose que tout l'écoulement mesuré est le résultat d'une seule fracture traversant l'intervalle d'essai, les données issues de l'essai d'injection peuvent être utilisées pour calculer l'ouverture d'une fracture équivalente unique ($2b_{esf}$). Ce modèle suppose un écoulement laminaire et radial dans une fracture horizontale représentée par une ouverture lisse à parois parallèles. Ce modèle appliqué à un essai d'injection est représenté schématiquement à la figure 13. L'ouverture calculée pour une seule fracture équivalente est déterminée à partir de l'équation ci-dessous (Gale, 1978) :

$$2b_{esf} = \left\{ \frac{Q}{\Delta H} \frac{12\mu}{2\pi\rho g} \ln (r_b/r_w) \right\}^{1/3} \qquad (2)$$

où μ est la viscosité dynamique du fluide, ρ est la densité du fluide et g est l'accélération de la gravité.

À partir du modèle d'écoulement d'un milieu poreux équivalent, et posant r_b égal à 10 m, le rapport minimum et maximum $Q/\Delta H$ correspond à des conductivités hydrauliques équivalentes de la masse rocheuse de 2.9×10^{-12} $m \cdot s^{-1}$ et 2.4×10^{-4} $m \cdot s^{-1}$. Ces diverses valeurs du rapport $Q/\Delta H$ représentent des ouvertures calculées pour une seule fracture équivalente de 2.7 μm et 900 μm. Étant donné

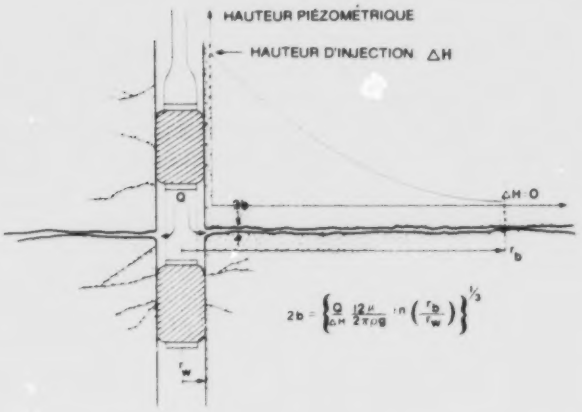


Figure 13. Schéma d'un essai d'injection à packer double dans une fracture simple.

que la plupart des intervalles d'essai traversent plus d'une fracture et que les ouvertures du réseau de fractures ne sont pas uniformes, un modèle d'écoulement réaliste qui permettrait d'analyser les données issues de l'essai d'injection serait probablement intermédiaire par rapport aux deux modèles dont nous venons de traiter.

Les essais d'injection ont permis d'identifier diverses zones à perméabilité significativement élevée. Dans bien des cas, ces zones sont associées à des fractures dans des couches minces (< 1 m d'épaisseur) de métagabbro dans un gneiss monzonitique. Les zones à perméabilité élevée sur le site à l'étude correspondent également à d'importantes fractures uniques ou à d'étroites zones de fractures interreliées. Les résultats des essais d'interférence hydraulique sur le site ont permis d'identifier quatre principales zones de fracture qui feront l'objet d'une étude détaillée à la section sur les résultats des essais d'interférence hydraulique.

Les intervalles d'essais présentant la perméabilité la plus faible étaient situés dans le trou de sondage FS-14. Le trou de sondage FS-14 a été foré dans un dyke vertical de diabase de 5 à 10 m de largeur. Les résultats des essais d'injection effectués dans le trou de sondage FS-14 confirment les résultats des essais d'interférence hydraulique effectués sur tout le dyke, qui indiquent que ce dyke agit comme une barrière imperméable locale s'opposant à l'écoulement des eaux souterraines.

Les résultats de tous les essais d'injection et de certains des pompages d'essai ont été analysés afin de déterminer la distribution de la conductivité hydraulique équivalente d'une masse rocheuse (K_{erm}) sur le site à l'étude. La figure 14 illustre la distribution du logarithme à base 10 de 340 mesures de la conductivité hydraulique. Cette distribution est tronquée à environ 10^{-11} m·s^{-1} (limite inférieure des essais d'injection) et est biaisée vers la droite, correspondant à des valeurs plus élevées de la conductivité hydraulique. La moyennes géométrique de toutes les déterminations de la conductivité hydraulique pour le site à l'étude est de 2.1×10^{-9} m·s^{-1}.

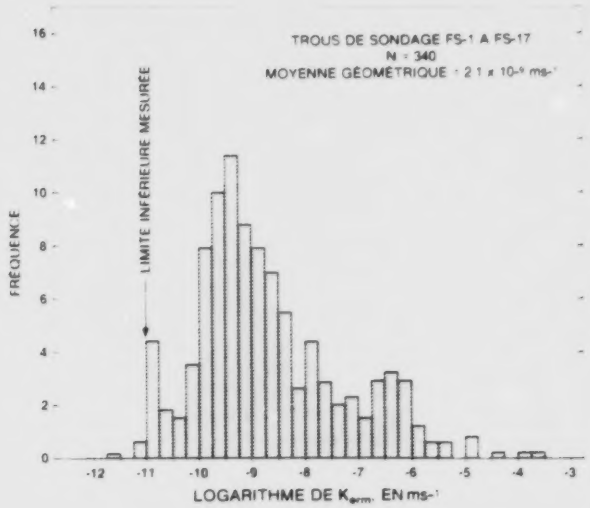


Figure 14. Distribution du logarithme à base 10 de la conductivité hydraulique équivalente de la masse rocheuse k_{erm} dans les trous de sondage FS-1 à FS-17, mesurée par des essais d'injection à packer double.

Les résultats des essais d'injection effectués dans les intervalles d'essais de 1.5 à 2.0 m de longueur ont également été ajoutés les uns aux autres afin de déterminer les valeurs du rapport $Q/\Delta H$ pour les intervalles d'essais plus longs isolés dans les tubages à packers multiples. Les valeurs du rapport $Q/\Delta H$ et les estimations de la conductivité hydraulique isotrope équivalente de la masse rocheuse (K_{erm}) pour chacun des intervalles du tubage sont données au tableau 6. La conductivité hydraulique a été déterminée pour les intervalles du tubage étant donné que les hauteurs piézométriques à l'équilibre et transitoires, ainsi que certains paramètres de la géochimie des eaux souterraines, ont été mesurés dans les intervalles du tubage. Afin d'évaluer la capacité des modèles numériques d'écoulement d'eau souterraine à décrire le système d'écoulement d'eau souterraine des LNCR, il faut mesurer sur le terrain la hauteur piézométrique, la conductivité hydraulique et la géochimie des eaux souterraines dans les mêmes intervalles d'essais.

Tableau 6. Propriétés hydrauliques des intervalles d'essais FS

Intervalle	Débit par unité de hauteur $Q/\Delta H$ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Conductivité hydraulique équivalente d'une masse rocheuse K_{erm} ($m \cdot s^{-1}$)*
FS 1-1	6.3×10^{-10}	8.0×10^{-11}
FS 1-2	1.3×10^{-8}	1.0×10^{-9}
FS 1-3	8.0×10^{-8}	6.4×10^{-9}
FS 1-4	1.8×10^{-8}	1.7×10^{-9}
FS 1-5	6.2×10^{-10}	1.0×10^{-10}
FS 2-1	2.5×10^{-9}	2.1×10^{-10}
FS 2-2	2.9×10^{-9}	2.7×10^{-10}
FS 2-3	1.1×10^{-6}	1.0×10^{-7}
FS 2-3†	6.5×10^{-7}	6.2×10^{-8}
FS 2-4	4.4×10^{-8}	5.2×10^{-9}
FS 2-5	3.9×10^{-8}	5.5×10^{-9}
FS 3-1	2.9×10^{-8}	2.3×10^{-9}
FS 3-2	8.5×10^{-8}	8.1×10^{-9}
FS 3-2†	7.8×10^{-8}	7.4×10^{-9}
FS 3-3	4.9×10^{-8}	5.7×10^{-9}
FS 3-4	8.0×10^{-9}	8.6×10^{-10}
FS 3-5	2.7×10^{-10}	8.0×10^{-11}
FS 3-6 N.D.	–	–
FS 4-1	2.8×10^{-9}	2.3×10^{-10}
FS 4-2	2.9×10^{-6}	1.5×10^{-7}
FS 4-2†	2.2×10^{-6}	1.8×10^{-7}
FS 4-3	2.8×10^{-6}	3.2×10^{-7}
FS 4-4	1.6×10^{-5}	1.9×10^{-6}
FS 4-5 N.D.	–	–
FS 4-6 N.D.	–	–
FS 5-1	6.5×10^{-7}	5.3×10^{-8}
FS 5-1†	8.0×10^{-7}	6.6×10^{-8}
FS 5-2	1.5×10^{-8}	1.2×10^{-9}
FS 5-3	5.4×10^{-9}	5.1×10^{-10}
FS 5-4	7.2×10^{-9}	1.1×10^{-9}
FS 5-5	2.3×10^{-7}	4.1×10^{-8}
FS 6-1	5.1×10^{-6}	3.6×10^{-7}
FS 6-1†	8.0×10^{-7}	5.6×10^{-8}
FS 6-2	5.3×10^{-9}	5.0×10^{-10}
FS 6-3	5.5×10^{-9}	1.0×10^{-9}
FS 6-4	9.8×10^{-9}	9.3×10^{-10}
FS 6-5 N.D.	–	–
FS 7-1	2.9×10^{-8}	1.8×10^{-9}
FS 7-2	1.4×10^{-7}	1.3×10^{-8}
FS 7-3	5.0×10^{-4}	5.3×10^{-5}
FS 7-4	5.0×10^{-6}	2.9×10^{-7}
FS 7-5	1.7×10^{-8}	1.2×10^{-9}
FS 7-6	4.4×10^{-9}	3.3×10^{-10}
FS 7-7	3.0×10^{-7}	5.6×10^{-8}
FS 8-1	4.0×10^{-9}	4.0×10^{-10}
FS 8-2	1.8×10^{-5}	1.4×10^{-6}

* À moins d'indications contraires, déterminé à partir d'essais d'injection à pression constante d'une durée de 30 à 120 min à des intervalles 1.5 à 2.0 m.

† Déterminé à partir d'un pompage d'essai à pression constante d'une durée de 72 h dans l'intervalle du tubage.

‡ Déterminé à partir de l'essai de rétablissement du niveau d'eau (volume en fonction du temps) dans l'intervalle du tubage.

N.D. Non déterminé par manque de données.

Tableau 6 (suite)

Intervalle	Débit par unité de hauteur $Q/\Delta H$ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Conductivité hydraulique équivalente d'une masse rocheuse K_{erm} ($m \cdot s^{-1}$)*
FS 8-3	1.7×10^{-9}	1.6×10^{-10}
FS 8-4	2.5×10^{-9}	1.9×10^{-10}
FS 8-5 N.D.	–	–
FS 9-1	2.2×10^{-7}	2.7×10^{-8}
FS 9-2	1.3×10^{-4}	1.5×10^{-5}
FS 9-3	3.0×10^{-8}	2.8×10^{-9}
FS 9-4	5.4×10^{-8}	4.3×10^{-9}
FS 9-5 N.D.	–	–
FS 9-6 N.D.	–	–
FS 10-1	3.4×10^{-5}	2.8×10^{-6}
FS 10-2	9.4×10^{-9}	7.5×10^{-10}
FS 10-3	1.7×10^{-9}	2.5×10^{-10}
FS 10-4	3.7×10^{-9}	3.9×10^{-10}
FS 10-5	8.3×10^{-9}	1.2×10^{-9}
FS 10-6 N.D.	–	–
FS 11-1	1.5×10^{-6}	1.8×10^{-7}
FS 11-2	2.7×10^{-6}	2.5×10^{-7}
FS 11-2†	1.3×10^{-6}	1.2×10^{-7}
FS 11-3	1.7×10^{-9}	1.9×10^{-10}
FS 11-4	1.1×10^{-10}	1.2×10^{-11}
FS 11-5	7.0×10^{-9}	6.6×10^{-10}
FS 11-6 N.D.	–	–
FS 12-1	2.2×10^{-8}	2.1×10^{-9}
FS 12-2	9.3×10^{-10}	9.8×10^{-11}
FS 12-3	1.3×10^{-8}	1.4×10^{-9}
FS 12-4†	4.5×10^{-8}	3.1×10^{-9}
FS 12-5 N.D.	–	–
FS 13-1	2.4×10^{-6}	2.3×10^{-7}
FS 13-2	6.7×10^{-8}	1.0×10^{-8}
FS 13-3	1.1×10^{-8}	1.3×10^{-9}
FS 13-4	6.6×10^{-7}	7.6×10^{-8}
FS 13-5	1.7×10^{-7}	2.0×10^{-9}
FS 13-6 N.D.	–	–
FS 14-1‡	1.5×10^{-11}	2.9×10^{-12}
FS 14-2‡	2.0×10^{-10}	2.3×10^{-11}
FS 14-3†	3.3×10^{-8}	2.3×10^{-9}
FS 14-4†	3.3×10^{-8}	2.4×10^{-9}
FS 14-5 N.D.	–	–
FS 15-1	1.6×10^{-6}	4.5×10^{-7}
FS 15-2	2.9×10^{-7}	3.7×10^{-8}
FS 15-3	3.7×10^{-6}	4.7×10^{-7}
FS 15-4	2.8×10^{-6}	1.7×10^{-7}
FS 15-5	1.5×10^{-7}	8.7×10^{-9}
FS 16-1	1.6×10^{-5}	5.6×10^{-6}
FS 16-2	1.4×10^{-6}	1.2×10^{-7}
FS 16-3	8.1×10^{-8}	1.0×10^{-8}
FS 16-4	3.0×10^{-8}	1.9×10^{-9}
FS 16-5	3.4×10^{-8}	1.9×10^{-9}
FS 17-1	7.6×10^{-6}	7.2×10^{-7}
FS 17-2	1.2×10^{-5}	9.5×10^{-7}
FS 17-3	4.1×10^{-5}	2.7×10^{-6}
FS 17-4	8.9×10^{-7}	1.1×10^{-7}
FS 17-5	9.8×10^{-7}	4.5×10^{-8}

Des valeurs de la conductivité hydraulique anisotrope (K_{ij}) ont également été calculées pour chacun des intervalles de tubage en intégrant les données sur l'orientation des fractures mesurées par image et l'ouverture des fractures calculée à partir des essais d'injection. La méthode et les résultats de la détermination de ces tenseurs de conductivité hydraulique seront examinés à la section «Détermination des tenseurs de conductivité hydraulique».

ESSAIS D'INTERFÉRENCE HYDRAULIQUE

Méthode

Des essais d'interférence hydraulique ont été effectués dans des trous de sondage ouverts et dans des intervalles d'essais dans le tubage afin d'évaluer les propriétés hydrauliques de la masse rocheuse. Des pompages d'essai à hauteur de rabattement constante et à débit constant ont été effectués sur le site à l'étude entre 1982 et 1984.

La plupart des essais d'interférence ont été analysés comme s'il s'agissait de pompages d'essais ou d'essais à débit constant. Les principes d'un essai à débit constant ou d'un pompage d'essai sont présentés schématiquement à la figure 15. La hauteur de rabattement est mesurée en fonction du temps dans un intervalle d'observation pour un débit constant ou une hauteur d' injection donnée dans un intervalle d'activation. La réponse mesurée dans l'intervalle d'observation est généralement fonction des propriétés hydrauliques du milieu ou de la masse rocheuse et des caractéristiques de la réaction à des intervalles d'observation et d'activation. L'une de ces caractéristiques les plus importantes est la capacité d'emmagasinage de ces deux types d'intervalles. Cette capacité s'exprime par un coefficient sans dimensions d'emmagasinement de puits de forage $\bar{C}$ (Earlougher 1977) :

$$\bar{C} = \frac{V\beta}{r_w^2 S} \qquad (3)$$

où V est le volume de l'intervalle d'essai, β la compressibilité de l'intervalle d'essai, r_w le rayon du trou de sondage et S la propriété d'emmagasinage du milieu étudié. La compressibilité β est une mesure du volume variable (ΔV) et des rapports variables de hauteur piézométrique (ΔH) de l'intervalle d'essai :

$$\beta = \frac{\Delta V}{V \Delta H} \qquad (4)$$

La capacité d'emmagasinement de l'intervalle d'essai ou du trou de forage masquera souvent la variation rapide de la hauteur de rabattement durant les essais d'interférence; si l'on ne considère pas ces effets dans des analyses classiques de Theis, on sous-estimera la transmissivité et on surestimera la propriété d'emmagasinage du milieu. L'importance de cette erreur s'accroît si l'espacement des trous de sondage est rapproché, si la transmissibilité du milieu (T) décroît et si le coefficient d'emmagasinement sans dimensions du trou de forage s'accroît.

ESSAI D'INTERFÉRENCE HYDRAULIQUE

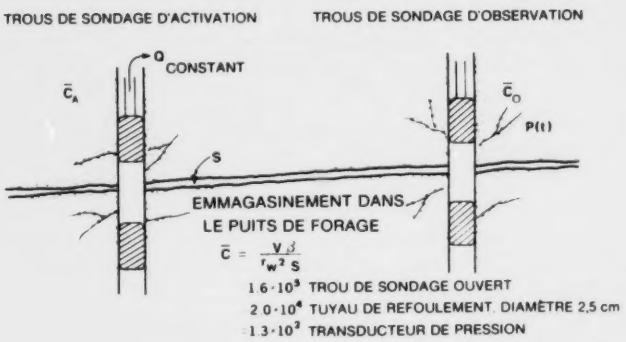


Figure 15. Schéma d'un essai d'interférence hydraulique à débit constant dans deux trous de sondage. Les données sur la variation de la hauteur de rabattement, P(t), utilisées pour déterminer les propriétés hydrauliques entre les trous de sondage, varient selon le coefficient d'emmagasinement dans le puits de forage $\bar{C}$, dans les trous d'activation et d'observation. La valeur de $\bar{C}$ est proportionnelle au produit volume (V) – compressibilité (β) de l'intervalle et de l'équipement du trou de sondage.

Jargon (1976) a démontré que le moment où l'effet d'emmagasinement dans l'intervalle d'essai d'activation deviendra négligeable dans un intervalle d'essai d'observation est donné par :

$$t = (230 + 15s)\left\{\frac{\bar{C}}{(r/r_w)^2}\right\}^{0.86} \frac{Sr^2}{T} \qquad (5)$$

où s est le facteur pelliculaire sans dimensions (Agarwal et coll., 1970) et r est l'espacement des trous de sondage. L'application de l'équation 5 à un trou de sondage ouvert où le facteur pelliculaire est de 0 donne l'équation approximative de Papadopoulos et Cooper (1967) pour l'instant à partir duquel l'emmagasinement dans le trou de forage est négligeable dans un puits :

$$t \approx 250 \frac{r_w^2}{T} \qquad (6)$$

Étant donné que les roches cristallines fracturées ont généralement une transmissibilité faible, il est essentiel

de prévoir des essais d'interférence qui minimiseront les effets d'emmagasinement dans les intervalles d'essai. Au site des LNCR, les trous de sondage ont été équipés de tubages à packers et à tuyaux de refoulement multiples et des transducteurs de pression ont souvent servi à mesurer les hauteurs de rabattement. Cela a généralement entraîné une diminution du coefficient d'emmagasinement sans dimensions du trou de forage $\overline{C}$ de 1.6×10^{5} pour un trou de sondage ouvert à 1.3×10^{2} pour un trou de sondage muni d'un packer et d'un transducteur de pression (figure 15). Pour un essai d'interférence dans une roche fracturée où $T = 1 \times 10^{-6}$ $m^2 \cdot s^{-1}$, $S = 2 \times 10^{-5}$, $r = 25$ m et $r_w = 0.08$ m, cette diminution du coefficient d'emmagasinement du trou de sondage diminue la période de débit dominée par l'emmagasinement dans un intervalle d'observation de 7300 min à 160 min. Cette diminution est particulièrement significative car les donnés à long terme sur les hauteurs de rabattement obtenues par les pompages d'essai dans les roches fracturées pourraient bien ne refléter que des effets de limite éloignés, complexes et incertains. Il est donc souvent nécessaire d'avoir des données fiables à court et à moyen terme afin de pouvoir évaluer les propriétés hydrauliques entre des trous de sondage.

Dans le cadre des essais d'interférence effectués au site des LNCR, des eaux souterraines ont été soutirées 1) de trous de sondage ouverts à l'aide d'une pompe électrique submersible de 76 mm de diamètre, 2) d'intervalles d'essai par pompage par émulsion ou par une pompe péristaltique de surface. Les débits ont été surveillés à l'aide d'un débitmètre à turbine et mesurés avec un chronomètre et une éprouvette ou un contenant gradués.

La variation de la hauteur de rabattement a été mesurée dans des trous de sondage ouverts à l'aide d'un transducteur à pression submersible ou d'un indicateur de niveau d'eau à contact électrique. Ces deux dispositifs avaient une sensibilité de l'ordre de 0.01 m. Aucun rabattement n'a été mesuré dans les intervalles d'essai des tubages soumis à un pompage par émulsion, alors que dans les cas de pompage par pompe péristaltique, on a mesuré un rabattement. La pompe péristaltique était reliée à un sondeur à packer-piézomètre gonflé de 22 mm de diamètre situé au fond du tuyau de refoulement en PVC de 25 mm de diamètre (figure 12). Le sondeur à packer-piézomètre a réduit de façon significative le coefficient d'emmagasinement du puits de forage de l'intervalle de pompage, ce qui a permis d'obtenir des données de refoulement plus fiables. Un transducteur de pression dans le sondeur à packer-piézomètre mesurait les hauteurs de rabattement avec une précision de 0.01 m.

La hauteur de rabattement dans les intervalles d'essais d'observation a été mesurée de trois manières : 1) à l'aide d'un indicateur de niveau d'eau à contact électrique, 2) à l'aide d'un transducteur à pression submersible avec ou sans packer gonflable 3) à l'aide de sondes à niveaux d'eau utilisant le principe de la capacitance. Les deux premières méthodes ont permis de mesurer avec précision les hauteurs de rabattement jusqu'à 0.01 m; la précision des sondes à niveaux d'eau était de l'ordre de 1.0 mm. L'utilisation de packers dans les transducteurs de pression submersibles permettait de réduire les effets de l'emmagasinement dans les intervalles d'essai d'observation et d'obtenir des données fiables à court terme sur la hauteur de rabattement.

Le débit, la pression et le niveau de l'eau ont été enregistrés à l'aide d'un enregistreur de données en temps réel et d'appareils enregistreurs à bandes à stylets multiples. Les mesures de pression et de niveaux d'eau enregistrées à l'aide de l'enregistreur de données ont été converties en hauteurs piézométriques et mises en tableau sous forme de hauteurs de rabattement en fonction du temps. Les courbes des hauteurs de rabattement et des temps ont été tracées sur des diagrammes diagnostiques log-log (Gringarten 1982) et analysées à l'aide de diverses techniques d'étude de courbes.

Résultats

De nombreux essais d'interférence hydraulique ont été effectués sur le site d'étude de l'écoulement des eaux souterraines des LNCR. Dix-neuf de ces essais ont fourni des données qui permettaient l'analyse et l'interprétation détaillées. Dans chacun des essais d'interférence, la variation de la hauteur de rabattement a été mesurée dans divers intervalles d'essais. Le tableau 7 présente un résumé des 19 essais d'interférence : informations sur le trou de sondage d'activation ou l'intervalle d'essai, date de l'essai, débit du pompage d'essai, durée de l'essai, intervalles d'observation et caractéristiques hydrogéologiques évaluées lors de chacun des essais. Les essais d'interférence hydraulique ont fourni des renseignements détaillés sur les propriétés hydrauliques de zones distinctes et étroites de fractures et de la masse rocheuse.

Durant les essais d'interférence au site des LNCR, la variation de la hauteur de rabattement a d'abord été observée le long de zones horizontales de fractures à conductivité hydraulique élevée, puis dans des intervalles d'essai situés verticalement, au-dessus et au-dessous des zones fracturées. Cette méthode indique que les essais d'interférence fournissent des renseignements sur les propriétés d'écoulement latéral des zones horizontales de fractures et les propriétés de l'écoulement vertical dans la masse rocheuse environnante. Les données obtenues ont également permis de démontrer l'influence des zones de fractures à conductivité hydraulique élevée sur les

Tableau 7. Résumé des essais d'interférence hydraulique

Trou de sondage d'activation ou intervalle d'essai	Date	Débit Q ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Durée de l'essai	Intervalles d'observation ou il y a réponse, FS	Caractéristiques hydrogéologiques évaluées
FS-7	82/05/15	Variable*	150	5-1,8-2,9-2	Zone de fractures n^{o} 1
FS-10	82/07/20-27	1.5×10^{-4}	10 060	5-1,7-3,8-2,9-2,13-2	Zone de fractures n^{o} 1
				Tous les autres intervalles dans FS-1 à 14	Propriétés de l'écoulement vertical dans la masse rocheuse
FS-10	82/08/20-27	1.5×10^{-4}	14 430	5-1,7-3,8-2,9-2,13-2	Zone de fractures n^{o} 1
				Tous les autres intervalles dans FS-1 à 14	Propriétés de l'écoulement vertical dans la masse rocheuse
FS 7-3	82/10/01	6.0×10^{-5}	270	5-1,8-2,9-2,10-1,13-2	Zone de fractures n^{o} 1
FS 8-2	82/10/02	3.0×10^{-5}	180	5-1,7-3,9-2,10-1,13-2	Zone de fractures n^{o} 1
FS 9-2	82/10/04	6.0×10^{-5}	180	5-1,7-3,8-2,10-1,13-2	Zone de fractures n^{o} 1
FS 10-1	82/10/05	3.0×10^{-5}	180	5-1,7-3,8-2,9-2,13-2	Zone de fractures n^{o} 1
FS-10	83/06/17-21	2.0×10^{-4}	6 145	5-1,5-2,5-3,5-4,5-5 6-1,6-2,6-3,6-4,6-5	Réponse du rabattement durant l'étude géochimique
FS-10	83/09/27-29	2.2×10^{-4}	2 900	9-2,15-1,16-2,17-1	Zone de fractures n^{o} 1
				Tous les autres intervalles dans FS-15, 16 et 17	Propriétés de l'écoulement vertical dans la masse rocheuse
FS 2-3	82/09/25 - 28	3.5×10^{-6}	4 200	3-2,4-4,4-2,5-2	Zone de fractures n^{os} 2 et 4
				2-1, 2-2	Propriétés de l'écoulement vertical dans la masse rocheuse
FS 4-2	82/08/16-19	3.5×10^{-6}	3 400	1-2,2-1,2-3,3-2,5-2,7-4 4-1,4-3,4-4,4-5	Zones de fractures n^{os} 2 et 4 Propriétés de l'écoulement vertical dans la masse rocheuse
FS 4-2	83/10/25	1.0×10^{-5}	295	17-3	Zones de fractures n^{os} 2 et 4
				17-1,17-2,17-4	Propriétés de l'écoulement vertical dans la masse rocheuse
FS 6-1	82/10/13-16	3.3×10^{-6}	4 400	2-1,10-4,11-2,13-4	Zone de fractures n^{o} 3
				6-2,6-3,6-4,10-3,10-4, 11-1,11-3,11-4	Propriétés de l'écoulement vertical dans la masse rocheuse
FS 6-1	83/10/27	9.5×10^{-6}	770	11-2,15-3,16-3	Zone de fractures n^{o} 3
				11-1,11-3,11-4,15-1 15-2,15-4,16-1,16-2,16-4	Propriétés de l'écoulement vertical dans la masse rocheuse
FS 11-2	82/10/27-29	3.5×10^{-6}	2 900	2-1,6-1,10-4,13-4	Zone de fractures n^{o} 3
				6-2,6-3,6-4,11-1,11-3 11-4	Propriétés de l'écoulement vertical dans la masse rocheuse
FS 11-2	83/09/8-9	8.3×10^{-6}	1 240	6-1,15-3	Zone de fractures n^{o} 3
				6-2,15-1,15-2,15-4	Propriétés de l'écoulement vertical dans la masse rocheuse
FS 15-3	83/10/24-26	1.7×10^{-5}	1 340	6-1,11-2	Zone de fractures n^{o} 3
				6-2, 6-3, 6-4, 11-1,11-3 11-4,15-1,15-2,15-4	Propriétés de l'écoulement vertical dans la masse rocheuse
FS 5-1	82/10/7-8	1.3×10^{-6}	1 380	5-2,5-3,5-4	Propriétés de l'écoulement vertical dans la masse rocheuse
FS 3-2	82/09/23-25	2.5×10^{-7}	2 800	3-1,3-3,3-4	Propriétés de l'écoulement vertical dans la masse rocheuse

*Essais à hauteur de rabattement constante.

caractéristiques de la réaction d'une masse rocheuse au pompage, ainsi que certaines des difficultés potentielles d'analyse et d'interprétation des effets de pompage dans les roches fracturées lorsque l'emplacement des zones de fractures est mal déterminé et les intervalles de surveillance sont excessivement longs.

Le présent rapport ne donne pas les résultats de tous les essais d'interférences hydrauliques effectués sur le site à l'étude; sont cependant présentés la plupart des essais importants effectués en vue d'évaluer les propriétés de l'écoulement dans les zones fracturées. Divers exemples de réponses verticales au pompage dans les zones de fractures à conductivité hydraulique élevée sont également présentés. L'annexe C présente toutes les réponses verticales pour le site à l'étude.

Le programme d'essai d'interférence hydraulique a permis d'identifier sur le site quatre zones de fractures étroites ou des grosses fractures uniques. Ces quatre zones de fractures (n^{os} 1 à 4) ont une étendue latérale supérieure à 50 m. Deux des zones de fractures sont sub-horizontales (n^{os} 1 et 2), l'une est oblique (n^{o} 3), l'autre est verticale (n^{o} 4). Les zones de fractures sont représentées sur une coupe centrale du site à l'étude, orientée nord-sud (figure 16). Les résultats des essais d'interférence hydraulique sont traités pour chacune des zones de fractures.

Zone de fractures n^{o} 1

Essais de pompage FS-10

La zone de fractures n^{o} 1 est une étroite zone sub-horizontale de fractures coupée par neuf intervalles d'essai : FS 5-1, 7-3, 8-2, 9-2, 10-1, 13-2, 15-1, 16-2 et 17-1 à des profondeurs de 33 à 50 m. La zone de fractures est associée à une mince (épaisseur < 1 m) couche mafique et semble être présente dans toute la zone à l'étude. Deux pompages d'essai dans des trous de sondage ouverts ont été effectués à partir du trou de sondage FS-10 du 20 au 27 août 1982 et du 27 au 29 septembre 1983 afin d'évaluer les propriétés entre les trous de sondage et d'essayer les intervalles FS 5-1, 7-3, 8-2, 9-2 et 13-2 et FS 15-1, 16-2 et 17-1 respectivement. Les figures 17 et 18 illustrent l'emplacement des trous de sondage et des courbes de la hauteur de rabattement en fonction du temps (log) pour les deux pompages d'essai. Le deuxième pompage d'essai a été effectué parce que les trous de sondage FS-15, 16 et 17 n'étaient pas forés au moment où le premier pompage d'essai avait été effectuée dans FS-10.

Les variations de la hauteur de rabattement, illustrées aux figures 17 et 18, sont semblables et indiquent : 1) une variation linéaire à long terme pour les intervalles de pompage et d'observation, 2) une variation semblable du rabattement pour tous les intervalles de l'essai d'observation, peu importe leur position par rapport au trou de sondage de pompage 3) une différence de rabattement d'environ 4 à 5 m entre les réponses des intervalles d'observation et de pompage.

La première interprétation des réponses en temps différé du rabattement à l'aide de l'approximation de Cooper et Jacob (1946) à la solution de Theis suggérerait que les trous de sondage sont situés dans une zone isotrope et homogène de fractures dont la transmissivité est de 4×10^{-6} m$^2 \cdot$s^{-1} et les propriétés d'emmagasinage sont variables. Il est possible de déterminer à l'aide du modèle à plaques parallèles une ouverture équivalente pour une seule fracture à partir de la transmissivité :

$$2b_{esf} = \left\{\frac{12\mu T}{\rho g}\right\}^{1/3} \qquad (7)$$

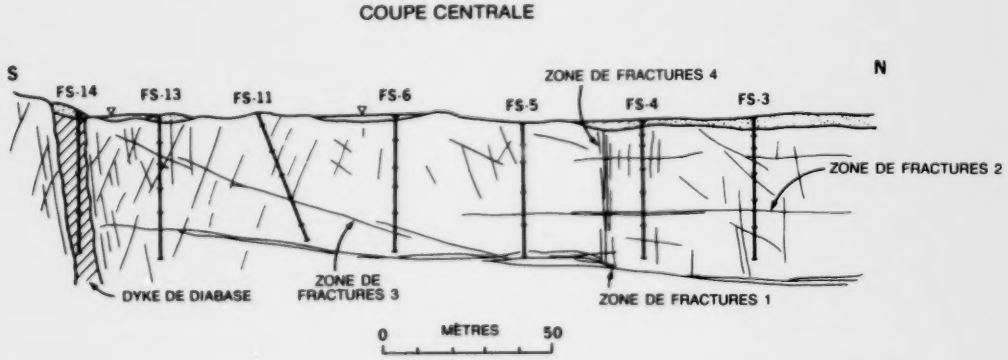


Figure 16. Coupe verticale dans la partie centrale du site à l'étude des LNCR illustrant les quatre zones de fractures identifiées à partir des essais hydrauliques.

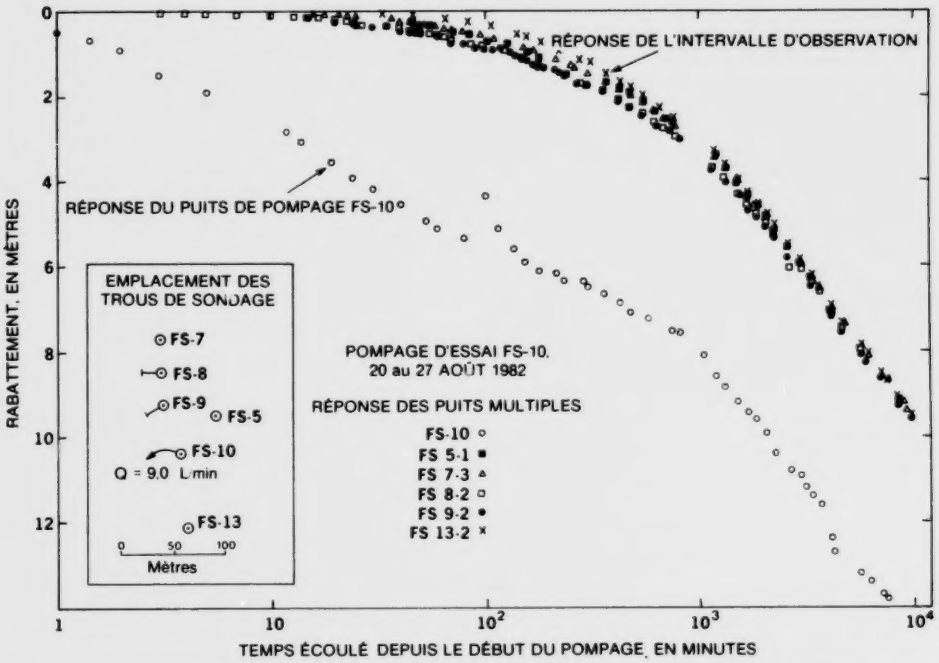


Figure 17. Rabattement en fonction du temps de réponse (log) des puits de pompage et des intervalles d'observation traversant la zone de fractures n° 1. Pompage d'essai FS-10, 20 au 27 août 1982.

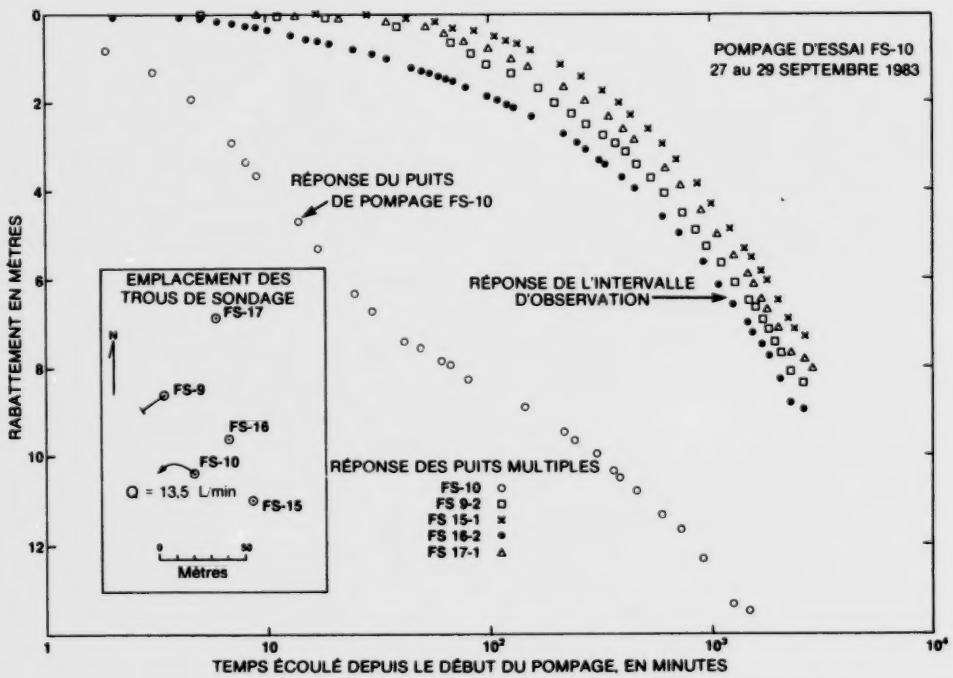


Figure 18. Rabattement en fonction du temps de réponse (log) des puits de pompage et des intervalles d'observation traversant la zone de fractures n° 1. Pompage d'essai FS-10, 27 au 29 septembre 1983.

La transmissivité en temps différé est équivalente à une ouverture de fracture de 190 μm. Les résultats des essais d'injection et d'autres pompages d'essai indiquent cependant que les données en temps différé après 500 à 1000 min reflètent une limite à perméabilité réduite et que les perméabilités entre les trous de sondage sont significativement plus élevées que pour une ouverture équivalente (une seule fracture) de 190 μm.

En présence d'une limite à perméabilité réduite, il est nécessaire d'avoir des données sur le rabattement en temps anticipé et en temps intermédiaire afin de pouvoir évaluer les propriétés hydrauliques entre les trous de sondage. Les données en temps anticipé peuvent cependant être dominées par des effets d'emmagasinement dans les puits de forage. L'équation 5 permet de prédire que théoriquement, les effets d'emmagasinement dans le puits de forage d'activation peuvent influencer la variation du rabattement jusqu'à 1000 min et plus. Aucune portion de la courbe représentant le rabattement ne peut donc être analysée pour expliquer les propriétés hydrauliques entre les trous de sondage. Afin de confirmer cette prédiction théorique, les données concernant les rabattements pour les pompages d'essai FS-10 ont servi à tracer la courbe du rabattement (log) en fonction du temps écoulé (log) (figures 19 et 20). La courbe log-log (Gringarten, 1982) permet d'identifier les régimes d'écoulement dominants. Ceux qui sont dominés par l'emmagasinement dans des puits de forage et/ou dans des fractures sont identifiés par une pente unitaire caractéristique sur la courbe log-log du rabattement en fonction du temps écoulé (Ramey, 1970). Les effets d'emmagasinement dans les puits de forage seraient généralement négligeables de 1 à 1.5 cycle de temps (log) après la fin de la pente unitaire (Earlougher, 1977). La pente unitaire apparaît clairement pour les variations du rabattement (figures 19 et 20) dans les puits de pompage et dans certains intervalles d'observation. L'écoulement dominé par l'emmagasinement persiste durant 100 à 500 min environ dans les deux essais. Aucune portion de la courbe de rabattement ne peut donc être analysée de façon fiable à l'aide des techniques classiques (Theis) afin de déterminer les propriétés hydrauliques entre les trous de sondage. Ces pompages d'essai fournissent cependant des renseignements qualitatifs d'importance sur les propriétés hydrauliques entre les trous de sondage, les types de limites, les liaisons hydrauliques et le comportement de larges zones de fractures soumises au pompage. D'après les variations observées du rabattement, la zone de fractures n^{o} 1 présente une perméabilité élevée au voisinage des trous de sondage d'essai (supérieure à 190 μm) et une limite éloignée de perméabilité réduite.

Le décalage de 4 à 5 m du rabattement observé dans le trou de pompage est probablement la conséquence d'un effet pelliculaire positif ou d'une perméabilité réduite au voisinage immédiat du puits de pompage. En effet, un effet pelliculaire positif entraîne une baisse de la hauteur piézométrique à mesure que du liquide pénètre dans le trou de sondage.

Cette diminution de la perméabilité peut être due au bouchage des fractures par des déblais de forage ou peut résulter d'hétérogénéités naturelles de perméabilité dans les fractures. Van Everdingen (1953) et Hurst (1953) ont représenté l'effet pelliculaire par un facteur s, fondé sur une couche infiniment petite dont la perméabilité est différente de celle du milieu environnant, et ils l'ont situé sur la face de la paroi du trou de sondage. Le facteur sans dimensions s est lié à une perte de charge (H_s) à travers la pellicule par l'équation suivante :

$$s = \frac{2\pi T H_s}{Q} \qquad (8)$$

où T est la transmissivité du milieu et Q est le débit de pompage dans le trou de sondage.

La figure 21 montre clairement l'existence d'un effet pelliculaire positif au trou de sondage en présentant la courbe du rétablissement du niveau de l'eau en fonction du rapport temps écoulé depuis le début du pompage – temps écoulé depuis la fin du pompage (en log). Les courbes des réponses du trou de sondage FS-10 sont tracées avec une réponse de l'intervalle d'observation FS 9-2 représentant le rétablissement dans la zone fracturée. En temps différé ou pour un rapport de temps faible, les réponses de rétablissement sont identiques; au contraire, en temps anticipé ou pour un rapport de temps important, les reponses diffèrent de 4 à 5 m au maximum. Cette différence maximale représente la perte de charge H_s due à un effet pelliculaire positif. Bien que cela ne soit pas montré dans le présent rapport, le facteur pelliculaire peut également être évalué en traçant la courbe des données de rétablissement en fonction de $t^{1/2}$ où t est le temps sur une courbe à coordonnées cartésiennes (Raghaven, 1977). Cette analyse produit des valeurs semblables de H_s pour le trou de forage et un petit effet pelliculaire négatif dans l'intervalle d'observation FS 9-2.

À partir de l'équation 8 et en supposant une valeur moyenne de transmissivité déterminée à partir des essais d'interférence et d'injection, un facteur pelliculaire de 5.6 a été calculé pour la zone de fractures n^{o} 1 dans le trou de sondage FS-10. Ce facteur pelliculaire déterminé à partir des pompages d'essai peut également être comparé aux résultats des essais d'injection à packer double qui mesurent les propriétés d'écoulement des liquides près du trou de sondage. En supposant que toute la hauteur d'injection (ΔH)

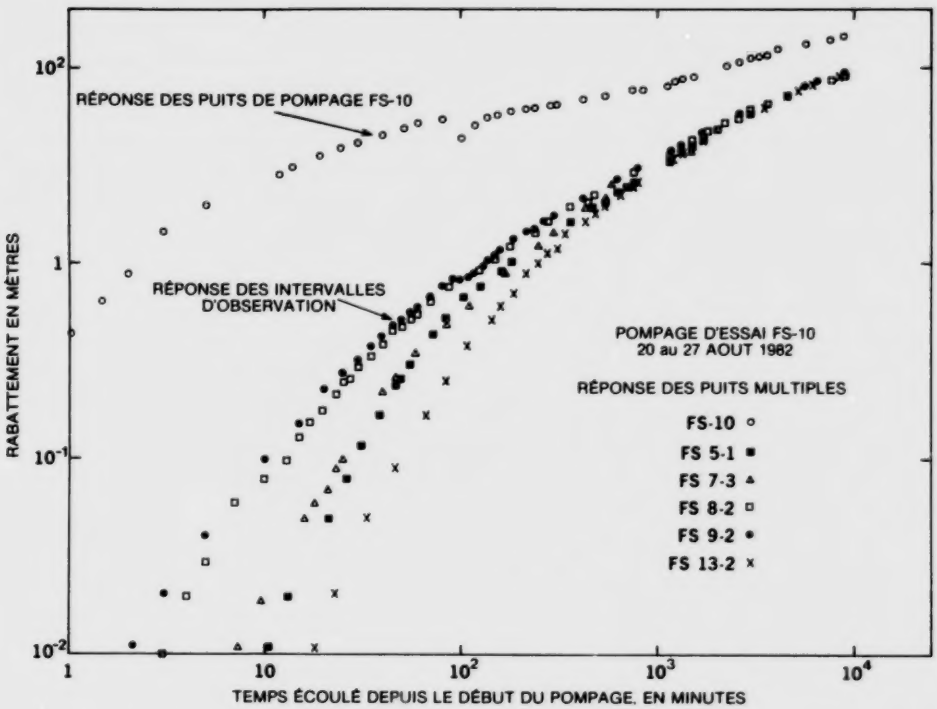


Figure 19. Rabattement (log) en fonction du temps de réponse (log) pour les puits de pompage et les intervalles d'observation traversant la zone de fractures n^{o} 1. Pompage d'essai FS-10, 20 au 27 août 1982.

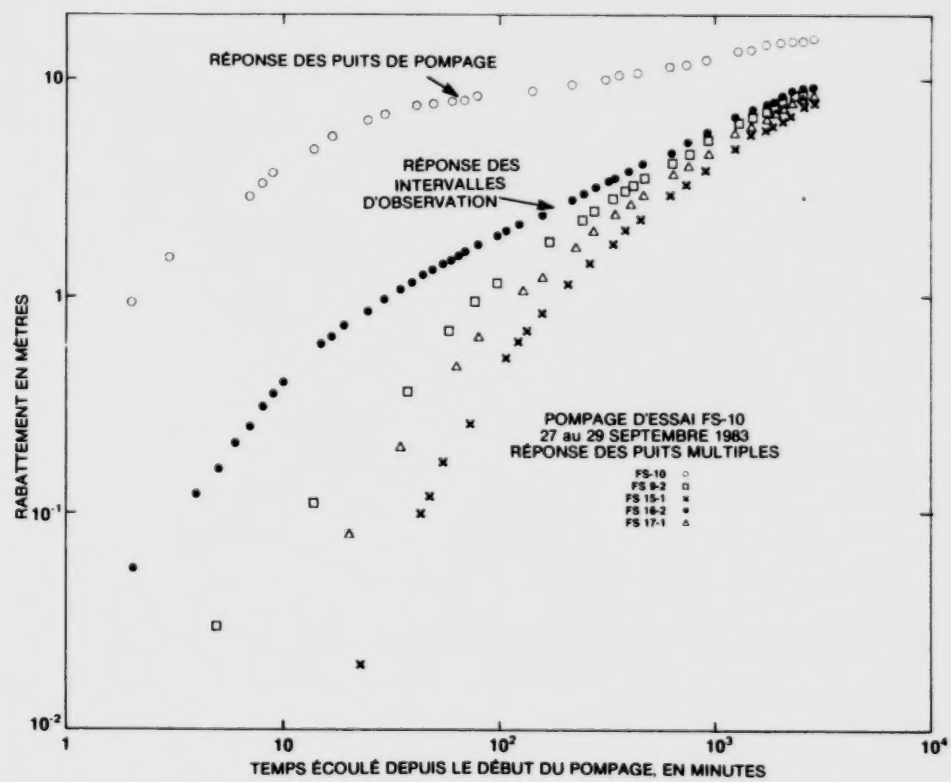


Figure 20. Rabattement (log) en fonction du temps de réponse (log) pour les puits de pompage et les intervalles d'observation traversant la zone de fractures n^{o} 1. Pompage d'essai FS-10, 27 au 29 septembre 1983.

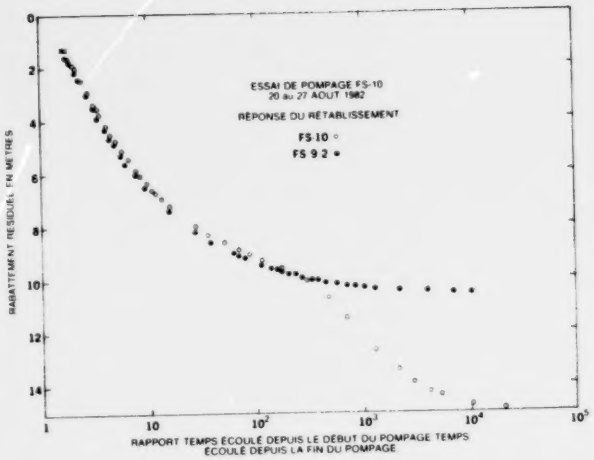


Figure 21. Réponse du rétablissement du niveau de l'eau du puits de pompage FS-10 et de l'intervalle d'observation FS 9-2 traversant la zone de fractures n° 1. La différence de la réponse de rétablissement en temps différé indique un facteur pelliculaire positif de 5.6 au puits de pompage.

se dissipe pendant l'écoulement à travers la pellicule, les données résultant de l'essai d'injection (Annexe B) conduisent à un facteur pelliculaire identique de 5.6 indiquant que la valeur de H_S, déterminée à partir des essais de rétablissement du niveau d'eau est fiable, et que la perte de hauteur à l'interface trou de sondage-fracture est linéairement proportionnelle au débit entre 6.7 x 10^{-5} $m^3 \cdot s^{-1}$ (essai d'injection) et 1.5 x 10^{-4} $m^3 \cdot s^{-1}$ (essai de rétablissement). Cette linéarité du débit et de la perte de hauteur indiquerait également que l'écoulement est laminaire dans la zone de fractures au voisinage du trou de pompage.

Bien que les données temps écoulé/rabattement issues des deux essais FS-10 ne soient, en général, pas utiles pour déterminer par des méthodes classiques les propriétés hydrauliques entre les trous de sondage de la zone de fractures n° 1, ces données peuvent servir à une analyse à partir d'autres modèles. En particulier, le modèle de fractures à flux uniforme horizontal unique (Gringarten et Ramey, 1974) pourrait être utilisé pour fournir des renseignements sur la perméabilité anisotrope (K_r, K_z) et la propriété d'emmagasinage (S) de la masse rocheuse dans laquelle se trouve la zone horizontale de fractures n° 1. La représentation de l'écoulement utilisée dans ce modèle est illustrée schématiquement à la figure 22. Une fracture à perméabilité élevée de rayon r_f est contenue dans un milieu poreux anisotrope de rayon infini et d'épaisseur h. Le milieu poreux est limité horizontalement par des couches

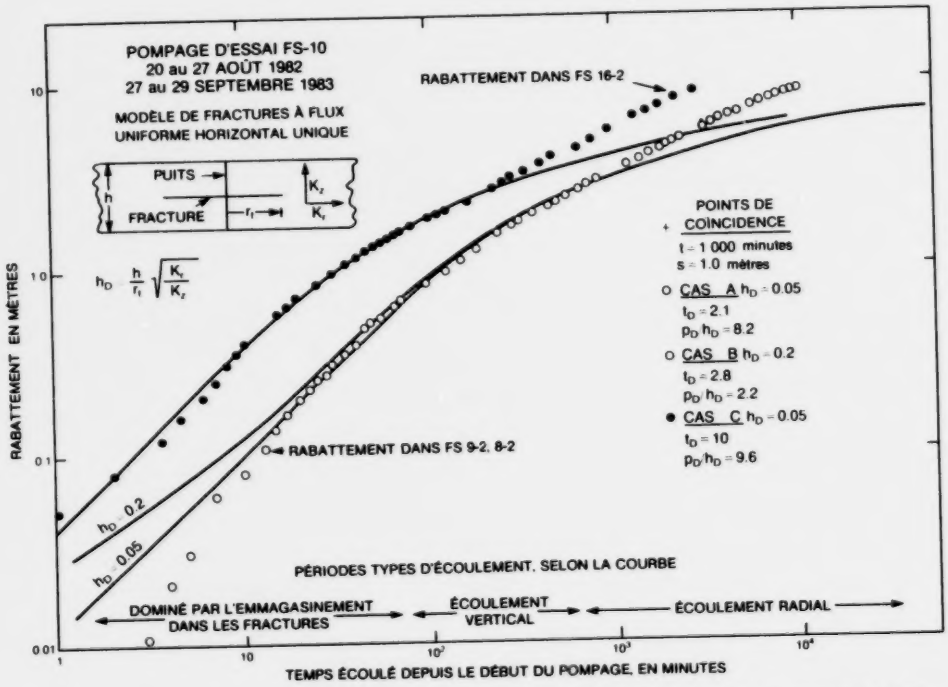


Figure 22. Rabattement (log) en fonction du temps de réponse (log) dans la zone de fractures n° 1 durant deux pompages d'essai effectués à partir du trou de sondage FS-10. Courbes à ajustement optimal du modèle de fractures à flux uniforme horizontal unique de Gringarten et Ramey (1974).

imperméables. De plus, le modèle suppose que la fracture horizontale a une perméabilité suffisante pour qu'il y ait des gradients hydrauliques négligeables le long de la fracture dirigée vers le trou de pompage.

Les données géologiques et hydrogéologiques disponibles indiqueraient que le modèle de fractures de Gringarten s'applique au système d'écoulement étudié par le pompage dans la zone de fractures n° 1 à partir du trou de sondage FS-10. La réponse quasi-uniforme dans les intervalles d'observation qui traversent la zone de fractures indique la présence d'un gradient négligeable dans la zone fracturée. Des essais d'injection à packer double montrent également la perméabilité élevée de la zone de fractures par rapport à la masse rocheuse. La masse rocheuse présente également un drainage ou des régimes d'écoulement verticaux vers la zone fracturée durant le pompage.

Les données de rabattement pour la zone fracturée obtenues durant les deux essais de pompage FS-10 sont représentées à la figure 22 (intervalles d'observation FS 8-2, FS 9-2 et FS 16-2). Les données de rabattement pour le trou de pompage n'ont pas été utilisées à cause de la présence de l'effet pelliculaire positif dont nous avons parlé précédemment. Les données ont été rapportées sur un graphique log-log avec les courbes à ajustement visuel optimal de Gringarten et coll. (1972). Les courbes-types présentent trois régimes d'écoulement distincts : un écoulement dominé par l'emmagasinement dans les fractures et le trou de sondage en temps anticipé, caractérisé par une pente d'une valeur unitaire; un écoulement linéaire vertical vers une fracture horizontale en temps intermédiaire et une pente égale à une demie; un écoulement radial en temps différé. Les données de rabattement pour les deux pompages d'essai indiquent un écoulement dominé par l'emmagasinement et un écoulement linéaire vertical, mais n'indiquent pas d'écoulement radial en temps différé. Les données de rabattement indiquent une persistance dans l'écoulement linéaire vertical depuis le temps intermédiaire jusqu'à la fin de l'essai.

Afin de déterminer les propriétés hydrauliques de la masse rocheuse, les courbes-types du modèle de fractures de Gringarten ont été ajustées visuellement aux données de rabattement. On a choisi comme rayon de fracture r_f une valeur de 100 m, d'après les renseignements disponibles. D'après des variations de rabattement vertical observées durant les pompages d'essai, on a choisi une épaisseur de la masse rocheuse, h, de 65 m. Les paramètres résultant K_r, K_z et S sont donnés au tableau 8. Les trois ajustements indiquent une conductivité hydraulique verticale d'environ $2 \times 10^{-5}\ m \cdot s^{-1}$, une conductivité hydraulique radiale de $2 \times 10^{-7}\ m \cdot s^{-1}$ et une propriété d'emmagasinage de 2×10^{-5}. Les conductivités hydrauliques calculées indiquent un rapport de la perméabilité verticale et de la perméabilité radiale d'environ 10 à 170.

Les valeurs de conductivité hydrauliques déterminées à partir du modèle de Gringarten se comparent aux résultats des essais d'injection à packer double. Les essais d'injection à packer double sur tout le site à l'étude ont révélé une conductivité hydraulique (moyenne géométrique) égale à $2.1 \times 10^{-9}\ m \cdot s^{-1}$. Étant donné que la plupart des trous de sondage sont verticaux, la moyenne obtenue à partir des essais d'injection reflète probablement la conductivité hydraulique radiale ou horizontale de la masse rocheuse et, dans une moindre mesure, une moyenne des conductivités hydrauliques verticales et horizontales. L'utilisation du modèle de Gringarten a produit une conductivité hydraulique radiale d'environ $2 \times 10^{-7}\ m \cdot s^{-1}$ et une moyenne des conductivités hydrauliques radiales et verticales $(K_r K_z)^{1/2}$ variant entre 5×10^{-7} et $3 \times 10^{-6}\ m \cdot s^{-1}$. La conductivité hydraulique de la masse rocheuse déterminée à partir du modèle de Gringarten est donc de deux à trois ordres de grandeur plus élevée que la conductivité hydraulique obtenue par les essais d'injection. Cette différence pourrait

Tableau 8. Propriétés hydrauliques de la masse rocheuse entourant la zone de fractures n° 1, déterminées à partir des essais de pompage FS-10 et en utilisant le modèle de fractures à flux uniforme Gringarten*

Données	h_D	Conductivité hydraulique ($m \cdot s^{-1}$)		Anisotropie K_z/K_r	Propriété d'emmagasinage
		K_r	K_z		
Cas A					
FS 8-2, 9-2	0.05	1.5×10^{-7}	2.5×10^{-5}	165	3×10^{-5}
Cas B					
FS 8-2, 9-2	0.2	1.6×10^{-7}	1.7×10^{-6}	10	2×10^{-5}
Cas C					
FS 16-2	0.05	2.6×10^{-7}	4.4×10^{-5}	170	1×10^{-5}

*Avec r_f = 100 m, h = 65 m.

être le résultat de la présence de fractures verticales à perméabilité élevée. Ainsi, la plus grande partie de l'écoulement traverserait des fractures verticales avant d'arriver à la fracture horizontale et au trou de pompage, entraînant une surestimation de la conductivité hydraulique de la masse rocheuse entre ces fractures verticales. Ou, au contraire, nos essais d'injection mesureraient probablement la conductivité hydraulique de la masse rocheuse entre les fractures verticales étant donné que la plupart des trous de sondage ont été forés à la verticale. L'estimation de la propriété d'emmagasinage, déterminée par le modèle de Gringarten, est probablement également une mesure des capacités d'emmagasinement d'une masse rocheuse contenant des fractures ou des zones de fractures verticales à perméabilité élevée. Il s'agit là probablement d'une estimation incertaine de l'emmagasinement spécifique d'une roche fracturée uniformément entre des fractures ou des zones de fractures verticales.

Pompages d'essai FS 7-3, 8-2, 9-2 et 10-1

Quatre pompages d'essai ont été effectués dans la zone de fractures nº 1 à l'aide de tubages équipés de multiples tuyaux de refoulement et packers. Les débits de pompage d'essai ont été diminués à 3.0×10^{-5} et 6.0×10^{-5} $m^3 \cdot s^{-1}$ afin de réduire le début des régimes d'écoulement vertical et les effets de limites éloignées et ainsi étendre la période d'écoulement radial infini dans la zone de fractures pour l'analyse des propriétés hydrauliques entre les trous de sondage. Les effets d'emmagasinement dans les intervalles d'essai d'activation ont été minimisés par l'utilisation de techniques de pompage par émulsion dans des tuyaux de refoulement de 25 mm de diamètre.

Les résultats de ces quatre pompages d'essai sont présentés sous forme temps écoulé (log)/ rabattement (log) (figures 23 à 26). Des courbes de Theis à ajustement visuel optimal ont été tracées sur ces figures. Ces courbes s'ajustent généralement bien aux données de rabattement pendant toute la durée des essais. Certains écarts entre les données et les courbes-types apparaissent en temps anticipé (moins de 5 min) et en temps différé (plus de 100 min). Ces écarts reflètent un écoulement dominé par l'emmagasinement en temps anticipé et des effets de limites éloignées ou de fuites verticales en temps différé.

Les transmissivités et les propriétés d'emmagasinage des fractures ont été déterminées à partir des pompages d'essai à l'aide de calculs classiques par points de coïncidence. Les données de transmissivité ont été exprimées par l'ouverture calculée pour une seule fracture équivalente $2b_{esf}$ à l'aide de l'équation 7. L'ouverture pour une seule fracture équivalente et les données sur les propriétés d'emmagasinage pour la zone de fractures nº 1 sont données dans des matrices intervalle d'activation/intervalle d'observation (tableaux 9 et 10). Les estimations de l'ouverture, pour les mêmes intervalles d'activation et d'observation (tableau 9) ont été déterminées à partir des résultats des essais d'injection à packer double. Les ouvertures calculées pour une seule fracture équivalente varient de 45 à 900 μm; les valeurs les plus élevées proviennent du coin nord-ouest du site à l'étude et les valeurs les plus faibles, de la portion sud. La zone de fractures nº 1 présente des valeurs d'ouverture moyenne d'environ 375 μm dans la moitié nord du site à l'étude et de 150 μm dans la moitié sud. La limite sud de la zone de fractures est bornée par un dyke imperméable de diabase. Les propriétés d'emmagasinage varient de 4×10^{-6} à 1×10^{-4} et la valeur moyenne pour le site est d'environ 2×10^{-5}.

Tableau 9. Ouverture équivalente calculée pour une seule fracture – zone de fractures nº 1 ($2b_{esf}$ en μm)

Intervalle d'activation	Intervalle d'observation								
	FS 5-1	7-3	8-2	9-2	10-1	13-2	15-1	16-2	17-1
FS 5-1	105	–	–	–	–	–	–	–	–
FS 7-3	285	900	390	360	350	235	–	–	–
FS 8-2	290	385	290	390	350	305	–	–	–
FS 9-1	275	366	490	558	465	380	–	–	–
FS 10-1	325	390	380	400	350	260	420	490	410
FS 13-2	–	–	–	–	–	45	–	–	–
FS 15-1	–	–	–	–	–	–	130	–	–
FS 16-2	–	–	–	–	–	–	–	110	–
FS 17-1	–	–	–	–	–	–	–	–	190

Zone de fractures nº 2

La zone de fractures nº 2 est une étroite zone subhorizontale de fractures, traversée par sept intervalles d'essai (FS 1-2, 2-1, 3-2, 4-2, 5-2, 7-4, 17-3) à des profondeurs de 25 à 30 m. Cette zone de fractures est située dans la moitié nord du site à l'étude.

Tableau 10. Propriétés d'emmagasinage des fractures – zone de fractures nº 1

Intervalle d'activation	Intervalle d'observation								
	FS 5-1	7-3	8-2	9-2	10-1	13-2	15-1	16-2	17-1
FS 7-3	2×10^{-5}	–	6×10^{-5}	2×10^{-5}	8×10^{-6}	8×10^{-6}	–	–	–
FS 8-2	3×10^{-5}	5×10^{-5}	–	7×10^{-6}	5×10^{-6}	2×10^{-5}	–	–	–
FS 9-2	1×10^{-5}	2×10^{-5}	4×10^{-6}	–	3×10^{-5}	6×10^{-5}	–	–	–
FS 10-1	2×10^{-5}	1×10^{-5}	8×10^{-6}	1×10^{-5}	–	1×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	9×10^{-6}

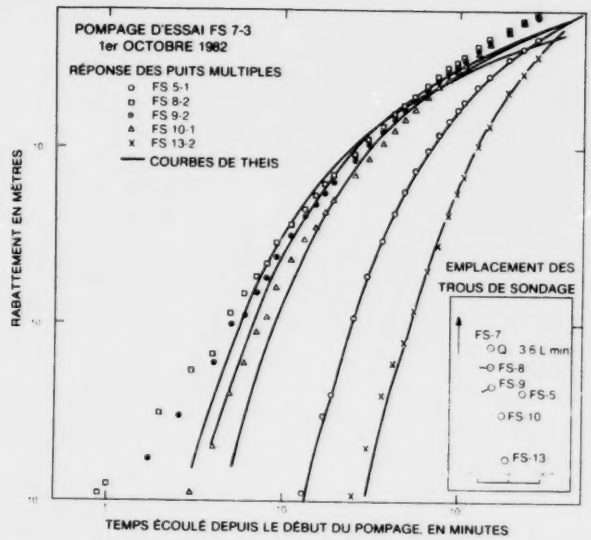


Figure 23. **Rabattement (log) en fonction du temp de réponse (log) pour les intervalles d'observation traversant la zone de fractures n° 1, avec courbes de Theis à ajustement optimal. Pompage d'essai FS 7-3, 1er octobre 1982.**

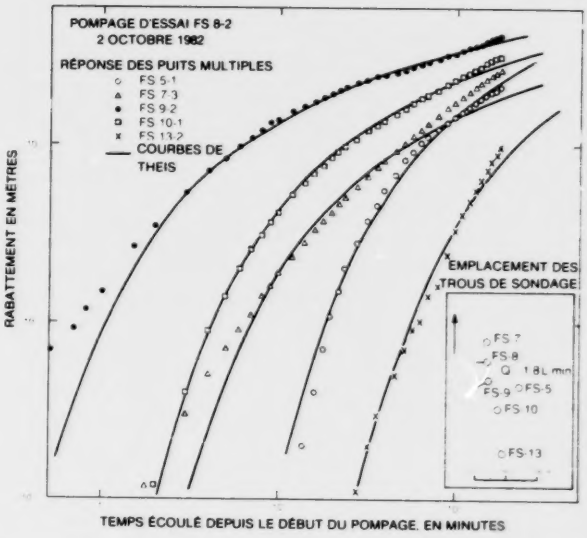


Figure 24. **Rabattement (log) en fonction du temps de réponse (log) pour les intervalles d'observation traversant la zone de fractures n° 1, avec courbes de Theis à ajustement optimal. Pompage d'essai FS 8-2, 2 octobre 1982.**

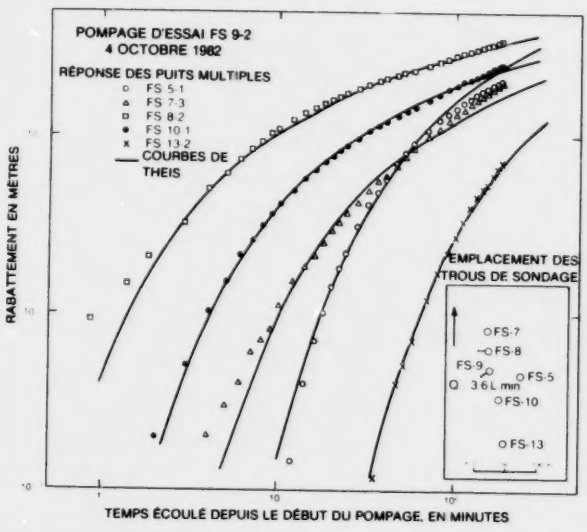


Figure 25. **Rabattement (log) en fonction du temps de réponse (log) pour les intervalles d'observation traversant la zone de fractures n° 1, avec courbes de Theis à ajustement optimal. Pompage d'essai FS 9-2, 4 octobre 1982.**

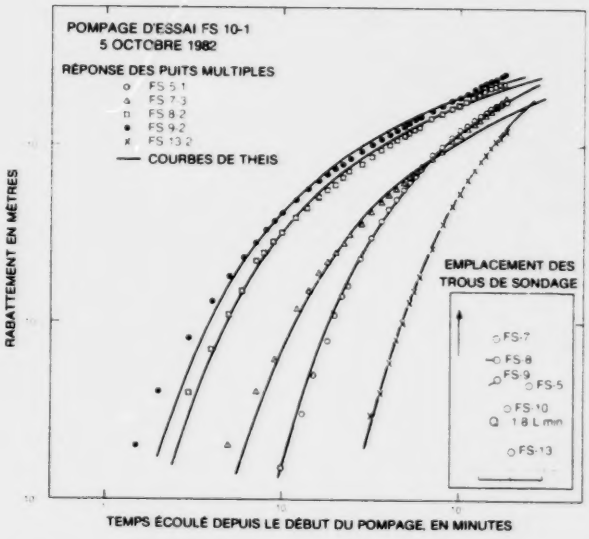


Figure 26. **Rabattement (log) en fonction du temps de réponse (log) pour les intervalles d'observation traversant la zone de fractures n° 1, avec courbes de Theis à ajustement optimal. Pompage d'essai FS 10-1, 5 octobre 1982.**

Un pompage d'essai de trois jours a été effectué à partir de l'intervalle d'essai FS 4-2 afin d'évaluer les propriétés hydrauliques entre les trous de sondage de la zone de fractures n° 2. Les variations des rabattements ont été enregistrées dans les six intervalles d'observation. Des courbes du rabattement (log) en fonction du temps écoulé (log) pour les intervalles d'observation FS 1-2, 2-1, 2-3, 3-2, 5-2 et 7-4, avec des courbes de Theis à ajustement visuel optimal sont présentées à la figure 27.

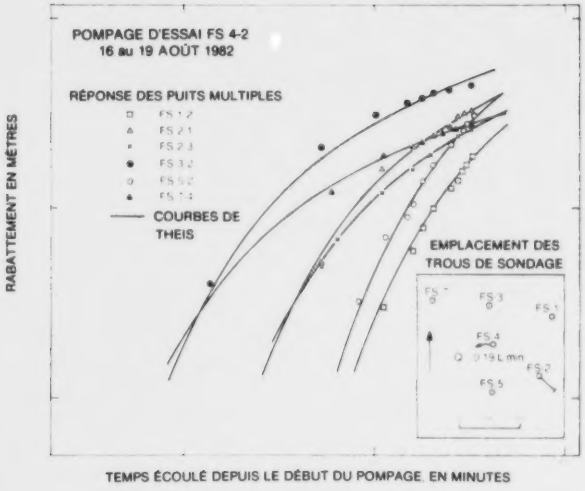


Figure 27. Rabattement (log) en fonction du temps de réponse (log) pour les intervalles d'observation traversant la zone de fractures n° 2, avec courbes de Theis à ajustement optimal. Pompage d'essai FS 4-2, 16 au 19 août 1982.

L'interprétation de la variation réponse des rabattements dans les intervalles d'observation FS 2-1, 2-3, 7-4 et 17-3 est compliquée par la proximité de la zone de fractures verticale n° 4 de ces intervalles. La zone fracturée n° 4 est l'expression souterraine d'un arrangement structural d'orientation nord-ouest, identifié dans les figures 4 et 9. La zone de fractures n° 4 est située à quelques mètres des trous de sondage FS-7, FS-4 et FS-2. L'arrangement structural et, probablement, la zone de fractures se terminent au voisinage du trou de sondage FS-2. Les variations des rabattements dans les intervalles FS 2-1, 2-3, 7-4 et 17-3 reflètent donc les propriétés hydrauliques combinées des zones de fractures n° 2 et n° 4.

Les ouvertures équivalentes calculées pour une seule fracture $2b_{esf}$ et les propriétés d'emmagasinage ont été déterminées pour les zones de fractures n° 2 et n° 4 à partir des essais d'interférence (tableaux 11 et 12). Les ouvertures données pour des intervalles d'essai d'activation et d'observation semblables (tableau 11) ont été déterminées à partir d'essais d'injection à packer double. Les tableaux 11 et 12 présentent également des données des essais d'interférence obtenues à partir d'un pompage d'essai effectué dans l'intervalle d'essai FS 2-3 entre le 25 et le 28 septembre 1982.

Les évaluations d'une ouverture équivalente calculée pour une seule fracture pour la zone de fractures n° 2 varient de 13 à 355 μm et la valeur moyenne est d'environ 100 μm. La zone de fractures présente la perméabilité la plus forte au voisinage des trous de sondage FS-4, FS-7 et FS-17 et diminue dans toutes les directions à une distance radiale d'environ 50 m des trous de sondage FS-4 et FS-17. Une propriété d'emmagasinage moyenne de 7×10^{-5} dans les fractures a été déterminée pour la zone de fractures n° 2 à partir des réponses de trois intervalles d'observation.

Tableau 11. Ouverture équivalente calculée pour une seule fracture — zones de fractures n^{os} 2 et 4 ($2b_{esf}$ en μm)

Intervalle d'activation	Intervalle d'observation								
	FS 1-2	2-1	2-3	3-2	4-2	4-4	5-2	7-4	17-3
FS 1-2	19*	–	–	–	–	–	–	–	–
FS 2-1	–	13*	–	–	–	–	–	–	–
FS 2-3	–	63†	–	–	195	116	116	–	–
FS 3-2	–	–	–	40*	–	–	–	–	–
FS 4-2	108*	123	140	131*	145*	60†	90*	165	196
FS 5-2	–	–	–	–	–	–	22*	–	–
FS 7-4	–	–	–	–	–	–	–	186*	–
FS 17-3	–	–	–	–	–	–	–	–	355*

* Propriété de la zone de fractures n° 2 seulement.

† Propriété de la zone de fractures n° 4 seulement, déterminée à partir d'essais verticaux de pulsion.

Tableau 12. Propriétés d'emmagasinage des fractures — zones de fractures n^{os} 2 et 4

Intervalle d'activation	Intervalle d'observation								
	FS 1-2	2-1	2-3	3-2	4-2	4-4	5-2	7-4	17-3
FS 2-3	–	–	–	–	1×10^{-4}	3×10^{-5}	2×10^{-4}		–
FS 4-2	9×10^{-5}*	6×10^{-5}	7×10^{-5}	4×10^{-5}*	–	–	1×10^{-4}*	1×10^{-5}	5×10^{-5}

* Propriété de la zone de fractures n° 2 seulement.

Zone de fractures nº 3

La zone de fractures nº 3 est une étroite zone de fractures inclinée coupée par sept intervalles d'essai (FS 2-1, 6-1, 10-4, 11-2, 13-4, 15-3 et 16-3) à des profondeurs de 18 à 38 m. D'après des données de sondage, la zone de fractures est située dans les portions sud et centrale de la zone à l'étude, à une orientation nord-ouest et une inclinaison d'environ 25° vers le nord-est. Cette zone de fractures est probablement l'expression souterraine de l'arrangement structural orienté nord-ouest qui apparaît sur les photographies aériennes et qui traverse le coin sud-ouest de la zone à l'étude (figures 4 et 9). La zone de fractures nº 3 est également associée à de minces couches mafiques dans le monzonite de quartz du site à l'étude.

Cinq pompages d'essai ont été effectués dans la zone de fractures nº 3 en utilisant les intervalles d'essai FS 6-1, 11-2 et 15-3 comme intervalles d'activation. Les réponses dans les intervalles d'observation dans quatre de ces pompages d'essai sont présentées sur des graphiques log-log avec des courbes de Theis à ajustement visuel optimal (figures 28 à 31). Les ouvertures équivalentes calculées pour une seule fracture, $2b_{esf}$ et les propriétés d'emmagasinage ont été déterminés à l'aide de calculs de points de coïncidence (tableaux 13 et 14). Les ouvertures équivalentes calculées pour une seule fracture varient de 13 à 240 μm (valeur moyenne d'environ 140 μm) dans les portions centrales et sud du site à l'étude. La zone de fractures semble disparaître vers le nord-est et le nord-ouest. Les propriétés d'emmagasinage varient de 1×10^{-6} à 1×10^{-4} et la valeur moyenne est de 1×10^{-5}.

Tableau 13. Ouverture équivalente calculée pour une seule fracture – zone de fractures nº 3 ($2b_{csf}$ en μm)

Intervalle d'activation	Intervalle d'observation						
	FS 2-1	6-1	10-4	11-2	13-4	15-3	16-3
FS 2-1	13	–	–	–	–	–	–
FS 6-1	137	190	120	110	240	132	135
FS 10-4	–	–	14	–	–	–	–
FS 11-2	115	141	205	190	150	140	–
FS 13-4	–	–	–	–	96	–	–
FS 15-3	–	145	–	124	–	125	–
FS 16-3	–	–	–	–	–	–	42

Zone de fractures nº 4

La zone de fractures nº 4 est une étroite zone verticale de fractures orientée nord-ouest, située dans les portions nord et centrale du site à l'étude. La zone de fractures est l'expression souterraine de l'arrangement structural d'orientation nord-ouest, identifié sur photographies aériennes, qui traverse le coin nord-ouest du site à l'étude. Étant donné que la zone fracturée est verticale, elle ne traverse à peu près aucun trou de sondage. Le trou de sondage FS-17 pourrait avoir traversé la zone de fractures sur une longueur de 10 à 20 m près du fond du trou. La zone de fractures nº 4 est située à une distance d'environ 1 à 2 m des trous de sondage FS-2, FS-4 et FS-7. La zone de fractures traverse probablement les zones fracturées nº 2 et nº 1 à des profondeurs respectives de 25 et 45 m. Bien que la zone de fractures traverse peu de trous de sondage, des données tirées d'essais d'interférences verticales, de modélisation numérique d'écoulement souterrain (Raven et coll., 1985) et de surveillance des hauteurs piézométriques (voir section «Surveillance des hauteurs piézométriques») indiqueraient l'existence d'une zone de fractures verticale à perméabilité élevée au voisinage de l'arrangement structural secondaire identifié sur des photographies aériennes, dont il est question ci-dessus.

Des essais d'interférence par pulsion verticale ont été effectués dans les trous de sondage FS-2 et FS-4 et analysés à l'aide des méthodes de Hirasaki (1974) afin de déterminer une diffusivité hydraulique verticale κ_v. Les réponses verticales mesurées dans des intervalles d'essais des trous de sondage FS-4 et FS-7 et FS-17 à la suite du pompage de la zone de fractures nº 1 ont également été analysées afin de déterminer la diffusivité verticale à l'aide de la méthode des rapports de Neuman et Witherspoon (1972) (voir section qui suit). Les valeurs de diffusivité verticale ont été converties en ouvertures équivalentes calculées pour une fracture $2b_{esf}$ à l'aide de l'équation 7 et la propriété d'emmagasinage a été estimée (5×10^{-5}) à partir des essais d'interférence dans les zones de fractures nº 2 et nº 4. Des ouvertures de 63 et de 60 μm ont été calculées pour les essais de pulsion respectivement dans FS-2 et FS-4 (tableau 11). Les réponses verticales mesurées dans des intervalles d'essais des trous de sondage FS-2, FS-4, FS-7 et FS-17 lors du pompage de la zone de

Tableau 14. Propriétés d'emmagasinage des fractures – zone de fractures nº 3

Intervalle d'activation	Intervalle d'observation						
	FS 2-1	6-1	10-4	11-2	13-4	15-3	16-3
FS 6-1	3×10^{-5}	–	1×10^{-4}	1×10^{-6}	1×10^{-4}	7×10^{-6}	2×10^{-5}
FS 11-2	2×10^{-5}	1×10^{-5}	5×10^{-5}	–	4×10^{-4}	1×10^{-6}	–
FS 15-3	–	5×10^{-6}	–	5×10^{-6}	–	–	–

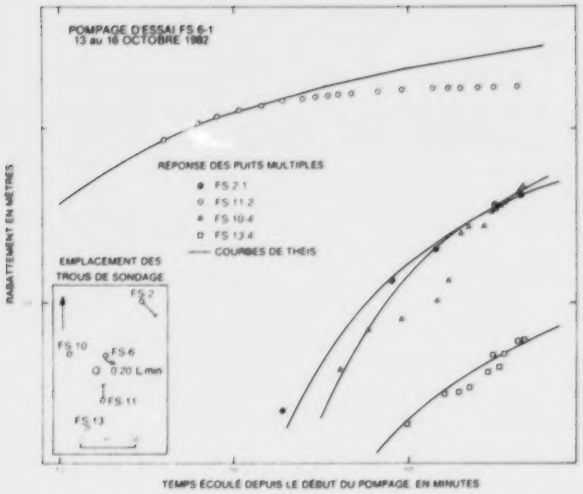


Figure 28. Rabattement (log) en fonction du temps de réponse (log) pour les intervalles d'observation traversant la zone de fractures n° 3, avec courbes de Theis à ajustement optimal. Pompage d'essai FS 6-1, 13 au 16 octobre 1982.

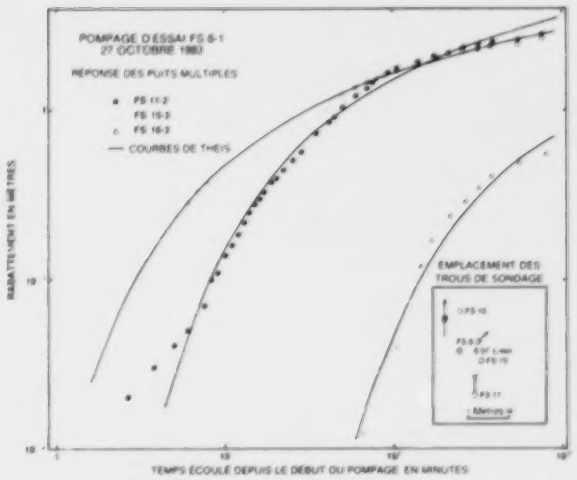


Figure 29. Rabattement (log) en fonction du temps de réponse (log) pour les intervalles d'observation traversant la zone de fractures n° 3, avec courbes de Theis à ajustement optimal. Pompage d'essai FS 6-1, 27 octobre 1983.

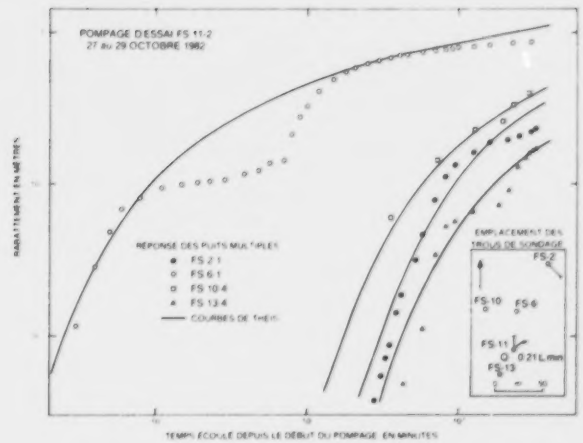


Figure 30. Rabattement (log) en fonction du temps de réponse (log) pour les intervalles d'observation traversant la zone de fractures n° 3, avec courbes de Theis à ajustement optimal. Pompage d'essai FS 11-2, 27 au 29 octobre 1982.

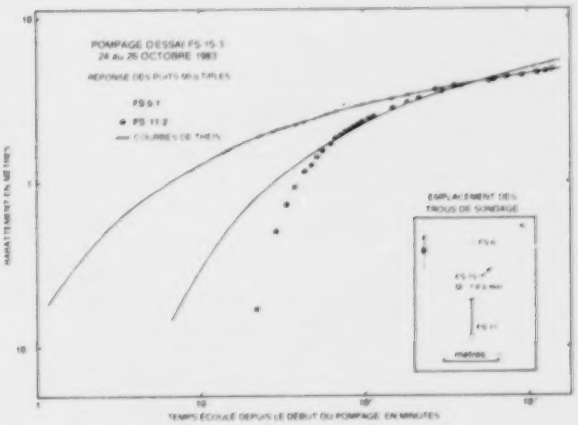


Figure 31. Rabattement (log) en fonction du temps de réponse (log) pour les intervalles d'observation traversant la zone de fractures n° 3, avec courbes de Theis à ajustement optimal. Pompage d'essai FS 15-3, 24 au 26 octobre 1983.

fractures n° 1 ont donné des ouvertures équivalentes calculées pour une fracture de 53, 76, 115 et 94 à 165 μm, respectivement. Des simulations numériques de l'écoulement sur le site à l'étude nécessitaient l'utilisation de perméabilités verticales équivalentes à des ouvertures calculées pour une seule fracture de 140 à 200 μm afin que correspondent les valeurs calculées de hauteur piézométrique et les distributions des hauteurs piézométriques observées sur le terrain.

En résumé, la zone de fractures n° 4 présente probablement des ouvertures calculées pour une seule fracture équivalente d'environ 60 à 200 μm et une perméabilité plus élevée dans le coin nord-ouest du site à l'étude près des trous de sondage FS-7 et FS-17 et la perméabilité la plus faible au voisinage du trou de sondage FS-2. Les ouvertures calculées pour une seule fracture équivalente et les propriétés d'emmagasinage déterminées à partir des essais

d'interférence effectués dans les zones de fractures nº 2 et nº 4 sont donnés aux tableaux 11 et 12.

Propriétés d'écoulement vertical dans la masse rocheuse

Lors du pompage des zones de fractures nº 1, nº 2 et nº 3, les rabattements ont été mesurés dans la roche à faible perméabilité située au-dessus et au-dessous des zones de fractures. Des variations des rabattements dans la roche à faible perméabilité se produisaient généralement en temps différé et étaient d'importance inférieure aux variations des rabattements observés dans les zones de fractures, ce qui suggère la présence d'un écoulement vertical dans la masse rocheuse environnante. Les figures 32 et 33 illustrent les réponses des rabattements dans la roche à faible perméabilité entourant la zone de fractures nº 1 et dans la zone de fractures nº 1 lors du pompage à partir du trou de sondage FS-10. Dans la figure 32, le trou de sondage FS-7 traverse la zone de fractures nº 1; dans la figure 33, la zone de fractures nº 1 est située sous le fond du trou de sondage FS-3. Comme dans la masse rocheuse située au-dessus des deux trous de sondage, les réponses des rabattements sont semblables, ces réponses sont vraisemblablement des mesures des propriétés verticales dans la masse rocheuse et ne sont pas simplement le fait de fuites du tubage ou du scellement des packers.

Supposons que les zones de fractures et la masse rocheuse à faible perméabilité environnante se comportent sur le plan hydraulique respectivement comme des aquifères et des aquitardes (c'est-à-dire écoulement horizontal dans les zones de fractures et écoulement vertical dans le reste de la masse rocheuse), alors les réponses des rabattements dans les zones de fractures et dans la masse rocheuse environnante peuvent être utilisées pour calculer la diffusivité hydraulique κ de la masse rocheuse. La diffusivité hydraulique est, par définition, le rapport de la transmissivité du milieu et de la propriété d'emmagasinage du milieu ou le rapport de la conductivité hydraulique (K) et de l'emmagasinement spécifique (S_s).

$$\kappa = T/S = K/S_s \qquad (9)$$

Diverses méthodes (Hirasaki 1974, Wolfe 1970, Hanshaw et Bredehoeft 1968, Neuman et Witherspoon 1972) peuvent être utilisées pour déterminer la diffusivité verticale d'une roche à faible perméabilité entourant une zone de fractures à perméabilité élevée. En général, ces diverses méthodes conduisent à des valeurs semblables. Les auteurs ont utilisé la méthode des rapports de Neuman et Witherspoon (1972) afin de déterminer la diffusivité verticale hydraulique de la roche à faible perméabilité entourant la zone de fractures nº 1 durant le pompage du trou de sondage FS-10. Même si les variations verticales des rabattements ont été mesurées pour la plupart des autres pompages d'essais effectués dans les zones de fractures nº 1, nº 2 et nº 3 (tableau 7), la présentation de l'analyse et de l'interprétation de toutes les données sort du cadre du présent rapport. Pour utiliser la méthode des rapports de Neuman et Witherspoon, les auteurs ont pris comme hypothèse que la zone de fractures nº 1 à perméabilité élevée et que la roche environnante à perméabilité faible se comportent comme des milieux poreux équivalents. Nous avons également supposé que la réponse mesurée des rabattements avait lieu à peu près au milieu de chacun des intervalles d'essais isolés par des packers. Pour pouvoir utiliser la méthode des rapports, il faut avoir des données sur les rabattements dans la zone de fractures et dans la roche à faible perméabilité et il faut connaître la diffusivité hydraulique de la zone de fractures. Avec des renseignements supplémentaires sur la distance verticale Z entre le milieu des intervalles d'essais et la zone de fractures, l'application de la méthode des rapports permet d'obtenir une diffusivité hydraulique verticale moyenne κ_v. Pour une masse rocheuse à N couches hétérogènes d'épaisseur b_i, la diffusivité verticale de chacune des couches κ_{vi} peut être calculée à partir de la valeur moyenne κ_v, à l'aide de l'équation suivante Neuman et Witherspoon, 1972) :

$$\kappa_v = Z/\left(\sum_{i=1}^{N} \frac{b_i}{\kappa_{vi}}\right) \qquad (10)$$

L'annexe C présente des données sur les rabattements pour des intervalles d'essai situés au-dessus et au-dessous de la zone de fractures nº 1 qui ont présenté une réponse lors des pompages d'essai FS-10 dans la zone de fractures nº 1. On a tracé la courbe des données de tous les trous de sondage (rabattement en mètres en fonction du temps écoulé en minutes). Aucune variation des rabattements n'a été observée dans les trous de sondage FS-12, et FS-14, forés dans le dyke imperméable de diabase. Les données de l'annexe C ont été analysées à l'aide de la méthode des rapports et de l'équation 10 afin de déterminer la diffusivité hydraulique de la roche à faible perméabilité (tableau 15).

Les diffusivités hydrauliques verticales varient de 2.4×10^{-5} à 1.6×10^{-1} $m^2 \cdot s^{-1}$ avec une valeur moyenne d'environ 2×10^{-4} $m^2 \cdot s^{-1}$. Dans plusieurs cas, les rabattements observés indiqueraient l'existence d'une fracture verticale à diffusivité élevée entre l'intervalle de surveillance et la zone de fractures nº 1. Ces réponses ont été observées dans certains des intervalles des trous de sondage FS-2, 3, 4, 5, 6, 7 et 11. Les réponses observées des trous de sondage FS-2, 4 et 7 résultent probablement d'un écoulement le long de la zone verticale de fractures nº 4. Les valeurs les plus importantes de diffusivité hydraulique

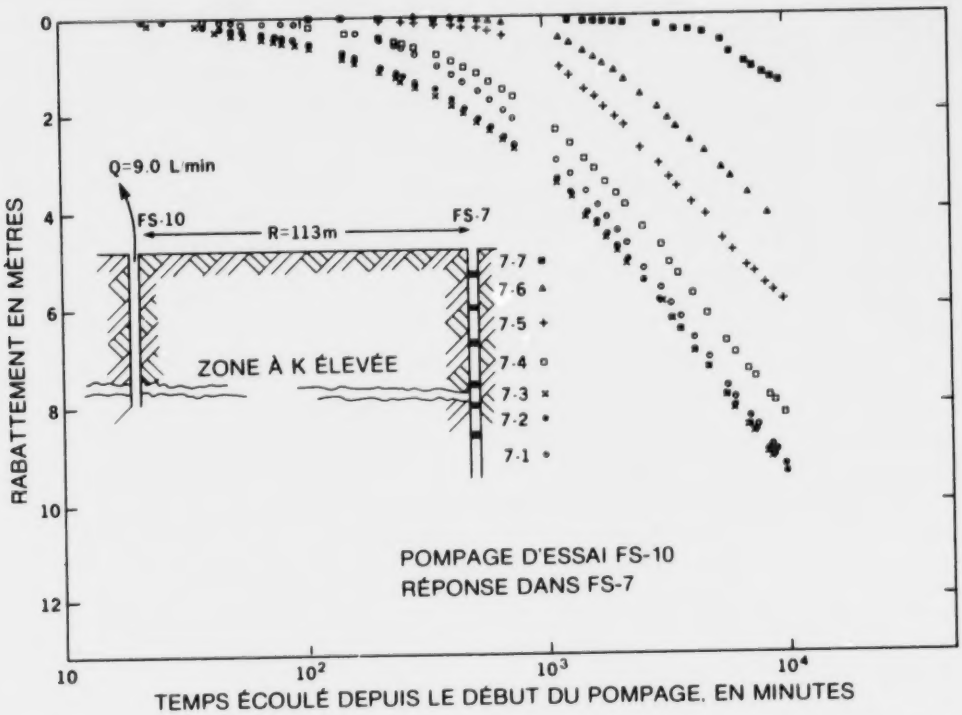


Figure 32. Rabattement (log) en fonction du temps de réponse (log) pour des intervalles d'observation du trou de sondage FS-7 présentant une réponse verticale au pompage dans la zone de fractures n^o 1 (zone à K élevée) traversant l'intervalle FS 7-3.

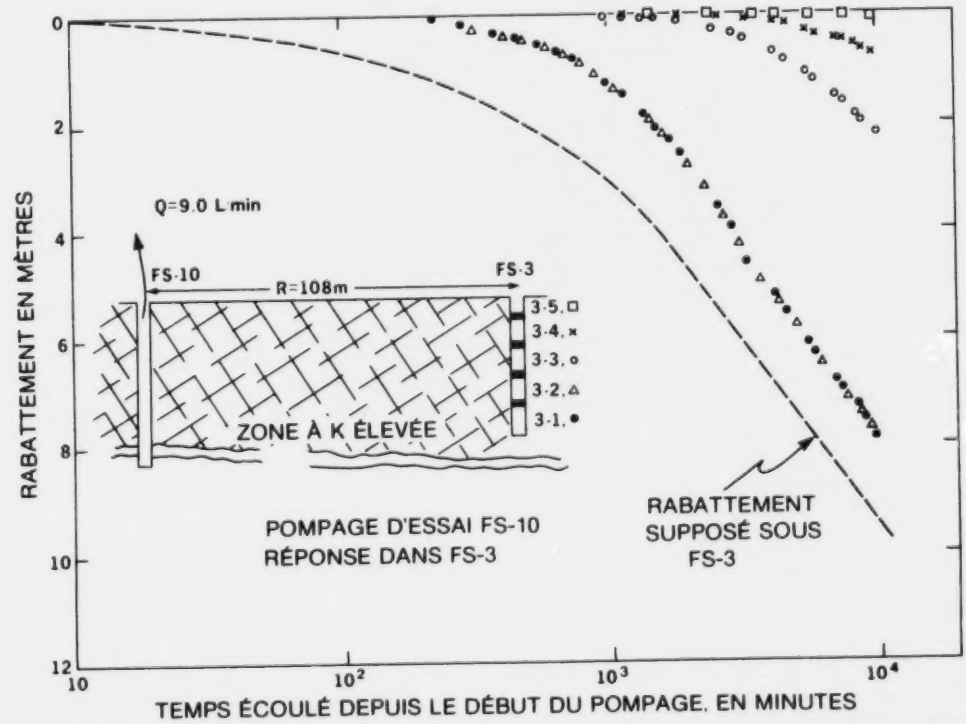


Figure 33. Rabattement (log) en fonction du temps de réponse (log) pour des intervalles d'observation du trou de sondage FS-3 présentant une réponse verticale au pompage dans la zone de fractures n^o 1 (zone à K élevée) située sous le fond du trou de sondage FS-3. Le rabattement supposé dans la zone de fractures n^o 1 a été déterminé à partir de la figure 32.

Tableau 15. Diffusivité hydraulique verticale

Trou de sondage	Profondeur de l'intervalle (m S.S.T.*)	κ_v ($m^2 \cdot s^{-1}$)
FS-1	11.7-24.0	1.1×10^{-4}
	24.0-30.0	1.3×10^{-4}
	30.0-53.0	1.9×10^{-3}
FS-2	11.8-19.0	2.4×10^{-5}
	19.0-48.7†	1.9×10^{-3}
	24.5-31.7	4.0×10^{-4}
	31.7-48.7‡	1.3×10^{-3}
FS-3	13.0-19.2	1.4×10^{-4}
	19.2-27.0	1.7×10^{-4}
	27.0-44.1	1.7×10^{-2}
	39.3-44.1‡	6.7×10^{-4}
FS-4	11.2-45.6†	4.5×10^{-3}
	18.5-27.4	1.1×10^{-3}
	27.4-45.6†	6.8×10^{-3}
	37.7-45.6‡	6.2×10^{-4}
FS-5	11.0-15.0	1.0×10^{-4}
	15.0-29.0	7.5×10^{-4}
	29.0-40.8§	2.4×10^{-4}
FS-6	12.0-19.0	5.0×10^{-5}
	19.0-42.0	4.0×10^{-4}
	25.0-35.0	7.0×10^{-5}
	35.0-42.0‡	2.0×10^{-4}
FS-7	5.0-11.0	4.0×10^{-4}
	11.0-25.0	5.4×10^{-3}
	25.0-37.0†	1.1×10^{-2}
FS-7	37.0-50.5†§	4.2×10^{-2}
	50.5-53.0†	2.6×10^{-3}
	50.5-67.0†	5.4×10^{-2}
FS-8	12.2-16.0	1.0×10^{-4}
	16.0-27.5	4.1×10^{-4}
	27.5-33.8§	7.1×10^{-4}
FS-9	10.3-25.4	1.6×10^{-3}
	25.4-31.2§	9.0×10^{-4}
	31.2-40.0†	1.6×10^{-1}
FS-11	8.4-12.4	1.8×10^{-5}
	12.4-21.5	2.0×10^{-4}
	21.5-32.7	1.2×10^{-4}
	32.6-41.1	5.0×10^{-4}
	36.4-41.1‡	2.0×10^{-4}
FS-13	19.0-27.0	2.6×10^{-5}
	27.0-33.0§	3.0×10^{-5}
	33.0-37.25	7.9×10^{-4}
FS-15	23.0-34.0	8.6×10^{-4}
	34.0-41.5	9.6×10^{-3}
	41.5-47.0§	3.8×10^{-2}

* Sous le sommet du tubage.

† Trajectoire à diffusivité élevée résultant probablement d'une fracture verticale à perméabilité élevée, reliant l'intervalle d'essai et la zone de fractures n° 1.

‡ Profondeur de la zone de fractures n° 1 déduite à partir de projections fondées sur des intersections dans d'autres trous de sondage.

§ Profondeur de la zone de fractures n° 1 interprétée à partir d'essais hydrauliques dans les trous de sondage et de diagraphies de fractures.

Tableau 15 (suite)

Trou de sondage	Profondeur de l'intervalle (m S.S.T.*)	κ_v ($m^2 \cdot s^{-1}$)
FS-16	23.0-33.5	5.4×10^{-4}
	33.5-40.0§	1.5×10^{-3}
	40.0-48.7	8.3×10^{-2}
FS-17	23.2-33.5	2.8×10^{-3}
	33.5-44.5†	1.1×10^{-2}
	44.5-52.0†§	6.2×10^{-2}

verticale ont été mesurées dans des intervalles d'essai des trous de sondage FS-7 et FS-17, situés à proximité de la zone de fractures n° 4.

SURVEILLANCE DES HAUTEURS PIÉZOMÉTRIQUES

Les mesures des distributions spatiales et temporelles des hauteurs piézométriques sont essentielles à toute étude de l'écoulement souterrain. Les mesures spatiales des variations des hauteurs piézométriques sont nécessaires pour déterminer le mouvement des eaux souterraines dans un système d'écoulement, ainsi que le degré de liaison hydraulique, s'il existe, entre des intervalles d'essai donnés. La mesure des variations temporelles des hauteurs piézométriques, en réponse à une infiltration différente provenant de la surface ou au pompage, fournit des renseignements précieux sur les conditions limitrophes et les divers régimes hydrogéologiques dans un système d'écoulement souterrain. De plus, l'évaluation de modèles numériques de simulation de l'écoulement souterrain à l'équilibre et dans des conditions transitoires nécessite des mesures détaillées et fiables de la distribution spatiale et temporelle des hauteurs piézométriques.

Après l'installation du tubage, les niveaux d'eau ont été surveillés plus ou moins continuellement dans chacun des intervalles d'essai à l'aide d'un indicateur de niveau d'eau à contact électrique. Les niveaux de l'eau ont été enregistrés dans des intervalles d'essai des trous de sondage FS-1 à 9, depuis août 1981, des trous de sondage FS-10 à 14, depuis juillet 1982 et des trous de sondage FS-15 à 17, depuis août 1983. Le résultat dans chacun des 90 intervalles d'essai isolés par des packers ont été convertis en hauteurs piézométriques dont on a tracé la courbe en fonction du temps sur des hydrographes des trous de sondage.

Distribution des hauteurs piézométriques

Masse rocheuse

Les hydrographes des intervalles d'essai ont permis d'identifier des périodes à régime transitoire minimal devant

servir à déterminer les distributions des hauteurs piézométriques à l'équilibre. Un exemple des variations de la hauteur piézométrique pour des intervalles d'essai du trou de sondage FS-2, enregistrées entre janvier 1982 et novembre 1984, est présenté à la figure 34. La présentation d'hydrographes pour des intervalles d'essai de tous les trous de sondage sort du cadre du présent rapport. Des hydrographes pour des intervalles d'essai des trous de sondage (FS-1 à 9), enregistrés entre août 1981 et mars 1982, sont donnés par Raven et Smedley (1982).

À deux reprises, soit le 15 décembre 1982 et le 1er novembre 1984, des données sur la hauteur piézométrique à l'équilibre ont été déterminées pour tout le site à l'étude (tableau 16). Comme cela apparaît sur la figure 34 pour le trou de sondage FS-2, le régime transitoire, causé par un pompage ou des variations rapides de l'infiltration provenant de la surface, sont à peu près nuls à ces dates. La distribution des hauteurs piézométriques, donnée au tableau 16, indique un système d'écoulement souterrain relativement simple en cours d'alimentation, orienté vers le nord et le nord-ouest en direction du lac Upper Bass. La composante horizontale de l'écoulement est gouvernée par la topographie de surface. Les gradients verticaux et horizontaux au site sont en moyenne de 0.15 et 0.02 respectivement.

Tous les intervalles d'essai sur le site à l'étude présentent une réponse rapide à des conditions différentes d'infiltration provenant de la surface. Généralement, la hauteur piézométrique s'accroît dans les intervalles d'essai à cause d'une infiltration accrue durant la fonte des neiges printanières et lorsque l'évapotranspiration est réduite à l'automne. La hauteur piézométrique diminue lorsqu'il y a diminution de l'infiltration provenant de la surface durant le gel et dans les cas où l'évapotranspiration potentielle est supérieure à la précipitation en été. Ces tendances générales apparaissent clairement sur l'hydrographe des intervalles d'essai du trou de sondage FS-2. Bien que les variations saisonnières de la hauteur piézométrique puissent atteindre 1.0 à 1.5 m, elles ne modifient pas de façon importante le régime général d'écoulement souterrain au site à l'étude; ce système reste dominé par l'écoulement vertical durant toute l'année.

Le gradient vertical dominant sur le site à l'étude est contrôlé par la présence d'une zone plane de fractures, à perméabilité élevée (zone nº 1), située à une profondeur de 33 à 50 m et à hauteur piézométrique peu élevée. La zone de fractures, que traversent les intervalles d'essai FS 5-1, 7-3, 8-2, 9-2, 10-1, 13-2, 15-1, 16-2 et 17-1 présente des hauteurs piézométriques uniformes dans tout le site à l'étude et agit comme limite de hauteur piézométrique constante. Des analyses des variations saisonnières des hauteurs piézométriques dans la zone de fractures nº 1 et dans la masse rocheuse qui la recouvre (Raven et Smedley, 1982) indiqueraient que la hauteur piézométrique dans cette zone est contrôlée par l'infiltration

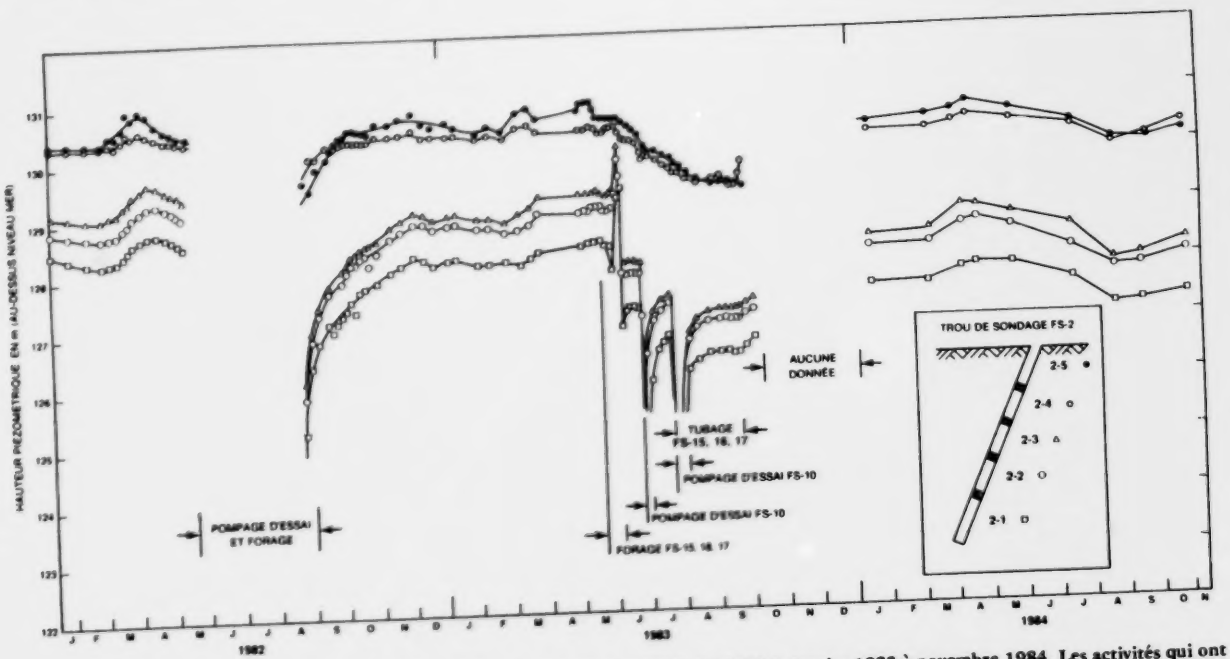


Figure 34. Hydrographe pour des intervalles d'essai dans le trou de sondage incliné FS-2, janvier 1982 à novembre 1984. Les activités qui ont causé des perturbations dans le relevé des hauteurs piézométriques sont indiquées.

Tableau 16. Hauteur piézométrique à l'équilibre dans des intervalles d'essais FS

Intervalle	Hauteur piézométrique (m au-dessus niveau mer) 82/12/15	84/11/01
FS 1-1	125.89	125.64
FS 1-2	126.63	125.68
FS 1-3	127.42	126.77
FS 1-4	128.02	127.61
FS 1-5	128.70	128.23
FS 2-1	128.23	127.34
FS 2-2	128.66	128.09
FS 2-3	129.02	128.25
FS 2-4	130.37	130.31
FS 2-5	130.61	130.41
FS 3-1	126.44	125.49
FS 3-2	126.46	125.51
FS 3-3	127.50	126.52
FS 3-4	129.65	128.67
FS 3-5	N.A.*	N.A.
FS 3-6	130.20	129.97
FS 4-1	126.99	125.76
FS 4-2	127.02	125.81
FS 4-3	128.74	127.87
FS 4-4	128.79	127.90
FS 4-5	N.A.	N.A.
FS 4-6	130.40	131.21
FS 5-1	125.59	124.60
FS 5-2	128.13	127.12
FS 5-3	128.41	127.41
FS 5-4	129.06	128.05
FS 5-5	130.07	128.92
FS 6-1	129.58	128.44
FS 6-2	130.38	129.59
FS 6-3	130.48	129.92
FS 6-4	130.90	130.36
FS 6-5	132.32	130.51
FS 7-1	125.60	124.60
FS 7-2	125.59	124.61
FS 7-3	125.58	124.60
FS 7-4	126.16	125.34
FS 7-5	126.42	125.60
FS 7-6	126.59	125.73
FS 7-7	127.91	125.94
FS 8-1	125.60	124.59
FS 8-2	125.58	124.60
FS 8-3	127.86	126.45
FS 8-4	129.15	127.31
FS 8-5	129.37	129.27
FS 9-1	125.59	124.58
FS 9-2	125.58	124.58
FS 9-3	125.69	124.62
FS 9-4	127.35	126.11
FS 9-5	130.70	131.32

* Intervalle d'essai non rejoint.
† Trou de sondage sans tubage.
‡ Intervalle d'essai en cours de rétablissement après un pompage d'essai.

Remarque : Le tiret indique trou de sondage non foré au moment des mesures.

Tableau 16 (suite)

Intervalle	Hauteur piézométrique (m au-dessus niveau mer) 82/12/15	84/11/01
FS 10-1	125.58	124.60†
FS 10-2	125.64	124.60
FS 10-3	130.26	124.60
FS 10-4	130.68	124.60
FS 10-5	130.67	124.60
FS 10-6	131.00	124.60
FS 11-1	129.86	129.16
FS 11-2	129.61	128.51
FS 11-3	130.62	129.86
FS 11-4	131.42	131.14
FS 11-5	133.30	133.40
FS 11-6	133.32	133.40
FS 12-1	135.20	134.28
FS 12-2	135.60	134.00
FS 12-3	135.38	134.17
FS 12-4	134.93	134.07
FS 12-5	133.56	133.13
FS 13-1	125.59	124.63
FS 13-2	125.61	124.65
FS 13-3	131.21	130.65
FS 13-4	133.04	132.87
FS 13-5	133.66	133.20
FS 13-6	133.68	133.66
FS 14-1	128.28‡	131.46
FS 14-2	132.70	132.30
FS 14-3	134.49	134.23
FS 14-4	134.47	134.32
FS 14-5	134.90	134.75
FS 15-1	–	125.50
FS 15-2	–	125.52
FS 15-3	–	128.54
FS 15-4	–	129.76
FS 15-5	–	131.95
FS 16-1	–	124.55
FS 16-2	–	124.60
FS 16-3	–	125.78
FS 16-4	–	127.53
FS 16-5	–	128.81
FS 17-1	–	124.60
FS 17-2	–	124.60
FS 17-3	–	125.35
FS 17-4	–	126.96
FS 17-5	–	128.37

provenant de la surface et les conditions des hauteurs piézométriques agissant dans des régions isolées du site à l'étude ou à l'extérieur de celui-ci. L'influence de caractéristiques isolées ou éloignées de hauteur piézométrique et d'infiltration sur l'écoulement dans le site à l'étude est également présentée au tableau 16. Les hauteurs piézométriques pour la zone de fractures n^{o} 1 et tous les intervalles d'essai, de profondeur moyenne à grande, sont inférieures d'environ 1.0 m en novembre 1984 par rapport à décembre

1982. Cependant, seuls quelques intervalles d'essai près de la surface ont présenté des variations significatives de la hauteur piézométrique entre ces deux dates, ce qui indiquerait la présence de conditions relativement uniformes de l'infiltration en provenance de la surface sur la plus grande partie du site à l'étude. La cause des variations de la hauteur piézométrique en profondeur est un cas particulier à certaines zones qui sont ou non dans le site à l'étude. Les intervalles d'essai du trou de sondage FS-7, situés près de la zone verticale de fractures nº 4 dans le coin nord-ouest du site à l'étude, présentent l'abaissement le plus régulier de la surface vers le fond. Ces données, avec d'autres données hydrogéologiques obtenues grâce aux essais hydrauliques et à l'échantillonnage des eaux souterraines, indiqueraient que la hauteur piézométrique dans la zone de fractures nº 1, et finalement, dans tous les intervalles d'essai de profondeur moyenne à grande, dépend probablement d'un marécage situé juste au nord-ouest du trou de sondage FS-7, par l'intermédiaire de la zone verticale de fractures nº 4.

Le comportement du système d'écoulement étudié aux LNCR sous diverses conditions d'infiltration indique que l'écoulement des eaux souterraines dans une masse rocheuse de 200 m par 150 m par 50 m de profondeur pourrait bien être régi par des conditions de hauteur piézométrique dues à une zone d'émergence éloignée, relativement peu étendue.

Les diverses données sur des hauteurs piézométriques pour des intervalles du trou de sondage FS-2 indiquent également l'important effet de court-circuit joué par les trous de sondage sans tubage sur la distribution des hauteurs piézométriques dans des trous de sondage à tubage adjacents. En mai 1983, les trous de sondage FS-15, 16 et 17 ont été forés et n'ont été pourvus de tubage que vers la mi-septembre 1983. Au cours du forage au diamant du trou de sondage FS-17, une augmentation brusque de la hauteur piézométrique a été observée dans les intervalles d'essai FS 2-1, 2-2 et 2-3, ce qui confirme la présence d'une liaison hydraulique entre les intervalles d'essai et le trou de sondage FS-17. Après le forage, les hauteurs piézométriques dans les intervalles FS 2-1, 2-2 et 2-3 étaient inférieures d'environ 1.0 m aux valeurs avant forage. Cette baisse de hauteurs piézométriques est supérieure à celle qui serait attribuable à une infiltration décroissante de la surface et reflète le drainage de la masse rocheuse au voisinage du trou de sondage FS-2 le long des zones de fractures nº 2 et nº 4 vers le trou de sondage FS-17 et dans le trou de sondage FS-17 vers la zone de fractures nº 1. Lors de l'installation de tubages dans le trou de sondage FS-17 à la mi-septembre 1983, le niveau des liquides dans les intervalles d'essai FS 2-1, 2-2 et 2-3 ont atteint des valeurs plus représentatives de la masse rocheuse dans laquelle a été foré le trou de sondage FS-2.

Des données complètes et détaillées sur les hauteurs piézométriques ont été compilées pour 90 intervalles d'essai durant les phases de rabattement et de rétablissement du niveau de l'eau des pompages d'essai effectués dans le trou de sondage FS-10 en août 1982 et septembre 1983. La courbe des rabattements mesurés dans les intervalles d'essai qui ont répondu (c'est-à-dire tous les intervalles sauf ceux des trous de sondage FS-12 et 14) a été tracée en fonction du temps écoulé (log) (annexe C). Ces courbes illustrent la série la plus complète de données sur les hauteurs hydrauliques temporaires pour tout le site à l'étude. Ces données sont utilisées à l'heure actuelle pour évaluer les propriétés d'emmagasinement spécifiques de la masse rocheuse et la capacité des modèles numériques à simuler l'écoulement dans des conditions transitoires.

Zone de fractures nºs 1, 2, 3 et 4

Des données sur les hauteurs piézométriques à l'équilibre ont été obtenues dans 9, 7 et 7 intervalles d'essai qui coupent les zones de fractures nºs 1, 2 et 3, respectivement. En supposant que les zones de fractures sont ouvertes ou reliées hydrauliquement en tout point dans les zones définies par les intersections des trous de sondage, les données sur les hauteurs piézométriques ont été utilisées pour estimer le régime général du mouvement des eaux souterraines dans les zones fracturées. On n'a pas tenté d'inclure les conditions limites éloignées du site pour chacune des zones de fractures dans les diagrammes des régimes d'écoulement.

La zone de fractures nº 1 est traversée par les intervalles d'essai FS 5-1, 7-3, 8-2, 9-2, 10-1, 13-2, 15-1, 16-2 et 17.1. Les valeurs de hauteur piézométrique pour tous ces intervalles d'essai, à l'exception de l'intervalle FS 15-1, sont, compte tenu des limites de précision des mesures (± 0.01 m), essentiellement identiques (tableau 16). Ces données indiquent des gradients hydrauliques maximum de 0.0001 qui sont probablement dirigés vers le nord. Dans l'intervalle d'essai FS 15-1, la hauteur piézométrique à l'équilibre est supérieure de 0.90 m à la valeur mesurée dans tout le reste de la zone de fractures. Cela indiquerait la présence d'une région à perméabilité réduite dans la zone de fractures nº 1 ou au voisinage du trou de sondage FS-15, dans laquelle les effets de réalimentation dominent la distribution locale des hauteurs piézométriques dans la zone de fractures. Les faibles gradients hydrauliques dans la zone de fractures nº 1 reflètent bien la conductivité hydraulique élevée de la zone de fractures, mesurée par des essais hydrauliques.

La zone de fractures nº 2 est coupée par les intervalles d'essai FS 1-2, 2-1, 3-2, 4-2, 5-2, 7-4 et 17-3. Comme on l'a montré pour la zone de fractures nº 1, les hauteurs piézométriques à l'équilibre dans la zone de fractures nº 2

sont inférieures d'environ 1.0 m le 1er novembre 1984 par rapport au 15 décembre 1982. Le régime d'écoulement des eaux souterraines est cependant semblable à ces deux dates. La figure 35 illustre les régimes estimés de l'écoulement souterrain dans la zone de fractures à ces dates. L'écoulement se fait vers le nord et le nord-ouest, avec un gradient hydraulique moyen de 0.01 à 0.02. Une certaine réalimentation locale, reflétée par le bombement des hauteurs piézométriques, apparaissait au voisinage du trou de sondage FS-3, le 1er novembre 1984.

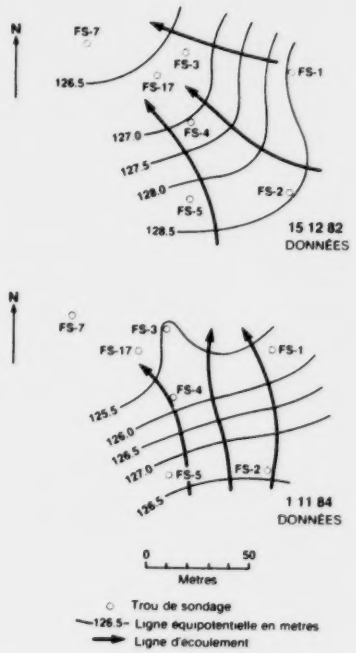


Figure 35. Régimes d'écoulement des eaux souterraines dans la zone de fractures nº 2, estimés à partir des données sur les hauteurs piézométriques à l'équilibre enregistrées le 15 décembre 1982 et le 1er novembre 1984.

La zone de fractures nº 3 est coupée par les intervalles d'essai FS 2-1, 6-1,10-4, 11-2, 13-4, 15-3 et 16-3 et est inclinée d'environ 25° vers le nord-est. Dans cette zone, les hauteurs piézométriques sont également inférieures d'environ 1.0 m le 1er novembre 1984 par rapport au 15 décembre 1985. Cependant, les régimes de mouvement des eaux souterraines sont significativement différents à ces dates, résultat principalement d'un abaissement de la hauteur piézométrique dans l'intervalle d'essai FS 10-4. Dans l'intervalle d'essai FS 10-4, la hauteur piézométrique a été abaissée d'environ 5 m par l'enlèvement du tubage, ce qui a rendu possible le drainage entre les zones de fractures nº 3 et nº 1. Les régimes d'écoulement souterrain dans la zone de fractures nº 3 à ces deux dates sont illustrés à la figure 36. Le 15 décembre, l'écoulement de 1982 suivait l'inclinaison vers le nord-est avec des gradients hydrauliques de 0.02 à 0.01. Le 1er novembre 1984, les eaux souterraines se dirigeaient vers le nord-ouest et le trou de sondage FS-10, avec des gradients hydrauliques de 0.03 à 0.2. À ces deux dates, les gradients hydrauliques les plus faibles ont été observés dans les zones de perméabilité les plus élevées, près des trous de sondage FS-16, 11 et 15.

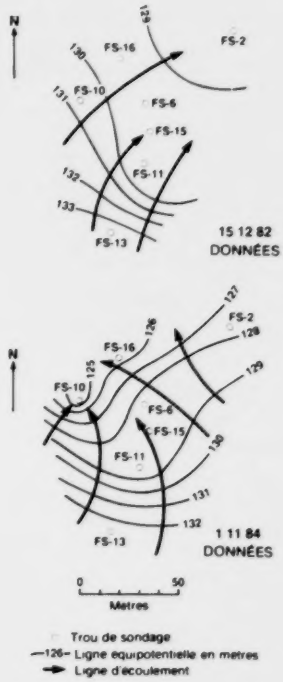


Figure 36. Régimes d'écoulement des eaux souterraines dans la zone de fractures nº 3, estimés à partir des données sur les hauteurs piézométriques à l'équilibre enregistrées le 15 décembre 1982 et le 1er novembre 1984. Un tubage à packer multiple a été installé dans le trou de sondage FS-10 le 15 décembre 1982 et enlevé le 1er novembre 1984.

Les régimes d'écoulement d'eau souterraine dans la zone verticale de fractures nº 4 sont plus difficiles à évaluer à cause du nombre limité de trous de sondage qui traversent cette zone. Si nous supposons cependant que les intervalles d'essais FS 4-2, 4-4, 7-1 à 7-7 et 17-1 à 17-3 sont suffisamment voisins de la zone de fractures nº 4 pour refléter les conditions de hauteur piézométrique dans la zone, il nous est possible d'affirmer certaines généralités au sujet du mouvement des eaux souterraines. Le mouvement semble être dirigé principalement vers le bas dans la zone de fractures nº 4, avec une composante horizontale dirigée vers le nord-ouest. Les gradients verticaux moyens diminuent de 0.1 à 0.02 du trou de sondage FS-4 à FS-7, alors

que les gradients horizontaux moyens entre les trous de sondage FS-4 et FS-7 sont d'environ 0.02.

DÉTERMINATION DES TENEURS DE CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE

La conductivité hydraulique d'une roche cristalline fracturée est principalement fonction de la géométrie du système de fractures (espacement, continuité, degré de liaison et ouverture), ainsi que de la conductivité hydraulique de la matrice rocheuse et de tous matériaux remplissant la fracture. Dans les roches cristallines fracturées, la perméabilité de la matrice ou de la roche intacte est généralement négligeable par rapport à la perméabilité résultant des fractures. Étant donné que les fractures et leurs propriétés hydrauliques sont distribuées tridimensionnellement dans une masse rocheuse, la conductivité hydraulique d'une roche cristalline fracturée sera à la fois hétérogène et anisotrope. Pour tenter de décrire l'anisotropie et l'hétérogénéité du champ de conductivité hydraulique, il faut pouvoir déterminer les caractéristiques tridimensionnelles des propriétés hydrauliques de la masse rocheuse. Afin de tenter de décrire la conductivité hydraulique au site à l'étude de Chalk River, les résultats des essais d'injection à packer double et des diagraphies ont été intégrés afin d'élaborer une représentation tensorielle de la conductivité hydraulique près des trous de sondage pour chacun des intervalles d'essai.

Description du modèle

Un modèle orientation-ouverture d'une fracture (Snow 1965, Rocha et Francis, 1975) a été utilisé afin de calculer les tenseurs de conductivité hydraulique pour chacun des intervalles d'essais. Le modèle prend comme hypothèse que les fractures peuvent être décrites comme des conduites planes, continues dans leur plan, et que l'interférence mutuelle aux intersections des fractures est négligeable. Le modèle prend également comme hypothèse l'existence d'un écoulement non turbulent, à phase unique, d'un liquide newtonien incompressible à travers les fractures rocheuses. Les fractures rocheuses sont représentées comme étant des plaques parallèles lisses à séparation ou ouverture uniforme. La perméabilité, ou conductivité hydraulique (K_f) d'une fracture à plaques parallèles lisses, est donnée par l'équation suivante :

$$K_f = \frac{(2b)^2 \rho g}{12 \mu} \qquad (11)$$

où : $2b$ = ouverture de la fracture
g = accélération due à la gravité
μ = viscosité dynamique du liquide
ρ = densité du liquide

Le tenseur ou ellipsoïde de conductivité hydraulique pour un intervalle d'essai est déterminé en ajoutant la perméabilité de chacune des fractures individuelles dans l'intervalle d'essai. La perméabilité de chacune des fractures se détermine en calculant la perméabilité d'un élément cubique d'un milieu continu dont les côtés sont égaux à l'espacement des fractures. L'écoulement qui traverse la face du cube est donc égal à l'écoulement de la fracture pour un même gradient.

Pour les données sur l'orientation des fractures obtenues lors des examens des trous de sondage, l'espacement réel des fractures est la distance entre une fracture et son image à une distance L égale à l'intervalle d'essai ou à la longueur de la ligne d'échantillonnage (Bianchi et Snow, 1969). Soit, sous forme d'équation :

$$W = L \left| n_i \cdot D_i \right| \qquad (12)$$

où : W = espacement réel des fractures
L = longueur de l'intervalle d'essai ou de la ligne d'échantillonnage
n_i = cosinus des directions de la normale à la fracture
D_i = cosinus de direction de la ligne d'échantillonnage

La contribution d'une fracture unique d'ouverture 2b aux tenseurs de perméabilité du milieu continu est (Snow, 1965) :

$$K_{ij} = \frac{\rho g (2b)^3}{12 \mu L \left| n_i \cdot D_i \right|} (\delta_{ij} \cdot M_{ij}) \qquad (13)$$

où : K_{ij} = tenseur de conductivité hydraulique pour un milieu continu équivalent
δ_{ij} = delta de Kronecker
M_{ij} = matrice de 3 x 3 formée par les cosinus de la normale au conduit

En résumant la contribution de chacune des fractures et en effectuant la diagonalisation, les teneurs symétriques qui en résultent, les principales conductivité hydrauliques et les principales directions d'un milieu continu équivalent qui leur sont associés sont calculés. Le modèle orientation-ouverture des fractures, utilisé dans le cadre de la présente analyse, permet de calculer le tenseur de perméabilité d'un milieu poreux continu équivalent à la masse rocheuse. Ces calculs sont cependant fondés sur des caractéristiques individuelles des fractures. Étant donné que le modèle orientation-ouverture des fractures néglige la longueur finie des fractures, l'on peut généralement s'attendre à ce que ce modèle surestime la conductivité hydraulique d'une masse rocheuse.

Afin de déterminer les principales conductivités hydrauliques, il faut obtenir des renseignements sur l'ouverture et l'orientation des fractures. Des données sur l'orientation des fractures ont été obtenues à partir d'examens par téléviseur et par récepteur acoustique. Les ouvertures des fractures ont été estimées indirectement à partir des résultats des essais d'injection. Pour ce premier calcul, nous avons pris comme hypothèse que toutes les fractures d'un intervalle d'essai d'injection de 1.5 à 2.0 m sont également conductrices. Il est cependant reconnu que les fractures d'un intervalle d'essai ne contribuent probablement pas également à l'écoulement. Cependant, d'un point de vue pratique, étant donné l'espacement étroit des fractures dans plusieurs intervalles d'essais, il serait impossible de déterminer les perméabilités individuelles des fractures dans de petits espacements isolés par des packers; il est inévitable qu'il faille faire des moyennes. La distribution des ouvertures de fractures est assurée dans la plupart des intervalles d'essais des tubages, étant donné que ces intervalles comprennent généralement plusieurs intervalles d'essais d'injection.

Les ouvertures individuelles des fractures ont été déterminées à partir du débit par hauteur unitaire en utilisant l'équation suivante, fondée sur le modèle à plaques parallèles.

$$2b_{eff} = \left\{ \frac{Q}{\Delta HN} \frac{12\mu}{2\pi\rho g} \ell n(r_b/r_w) \right\}^{1/3} \qquad (14)$$

où : $2b_{eff}$ = ouverture réelle de la fracture
r_b = rayon d'influence de l'essai d'injection (par hypothèse, 10 m)
r_w = rayon du trou de sondage
$Q/\Delta H$ = débit par unité de hauteur d'injection
N = nombre de fractures conductrices dans un intervalle d'essai d'injection

Comme l'indique l'équation 14, aucune tentative n'a été effectuée pour corriger les estimations des ouvertures des fractures dans le cas où des fractures traversaient l'axe du trou de sondage à des angles différents de 90°.

Plus de 1400 estimations d'ouvertures réelles de fractures ont été déterminées à partir d'essais d'injection et de diagraphies de fractures, mesurés dans 17 trous de sondage. Les ouvertures calculées variaient de 1.5 à 500 μm et la moyenne géométrique était de 11.8 μm. La distribution des ouvertures réelles de fractures dans tout le site à l'étude est illustrée à la figure 37.

Résultats

Un tenseur de conductivité hydraulique, K_{ij}, a été déterminé pour chacun des intervalles d'essais isolés par des

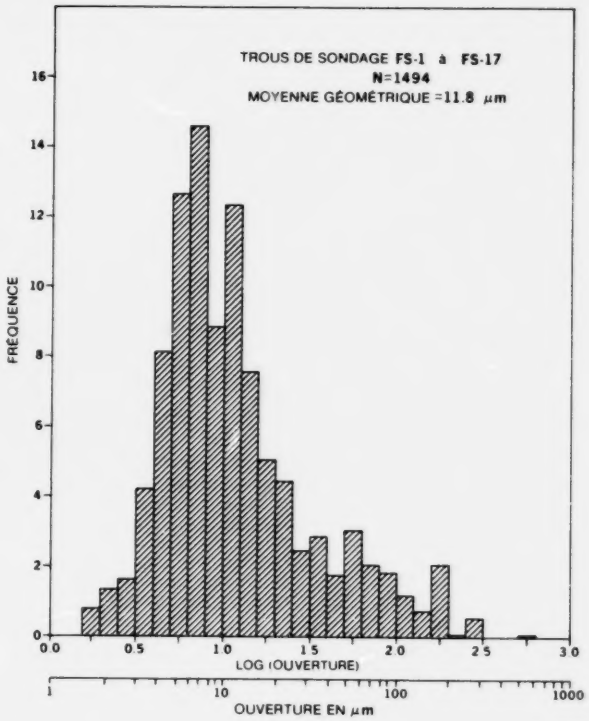


Figure 37. Distribution des logarithmes à base 10 des ouvertures réelles des fractures, $2b_{eff}$ dans les trous de sondage FS-1 à FS-17, déterminés à partir d'essais d'injection à packer double et de diagraphies obtenues par image acoustique dans les trous de sondage.

packers en ajoutant les unes aux autres les perméabilités réelles de chacune des fractures. Le tenseur symétrique qui en résulte, K_{ij} a été diagonalisé afin de déterminer les principales conductivités hydrauliques (valeurs propres) et les directions principales (vecteurs propres). Les conductivités hydrauliques principales (K_1, K_2, et K_3) dans trois directions orthogonales définissent un ellipsoïde de conductivité hydraulique (figure 38). Les directions principales par rapport aux trois axes géographiques de références sont définies par trois cosinus de direction (soit l_1, m_1, n_1, pour K_1). Les axes de références géographiques utilisés dans le présent rapport sont X_1 orienté vers le sud, X_2 vers l'est et X_3 vers le bas. Les conductivités hydrauliques principales et les directions principales pour chacun des intervalles d'essai isolés avec des packers sont donnés à l'annexe D. La moyenne géométrique du plan principal de conductivité hydraulique $K_1 K_2$ et le rapport d'anisotropie K_1/K_3 ont été calculés et sont présentés à l'annexe D.

Les conductivités hydrauliques principales données à l'annexe D varient de 10^{-11} à 10^{-5} $m \cdot s^{-1}$ et les rapports anisotropes varient entre 1 et 10, bien que certaines valeurs supérieures à 100 aient été calculées pour certains

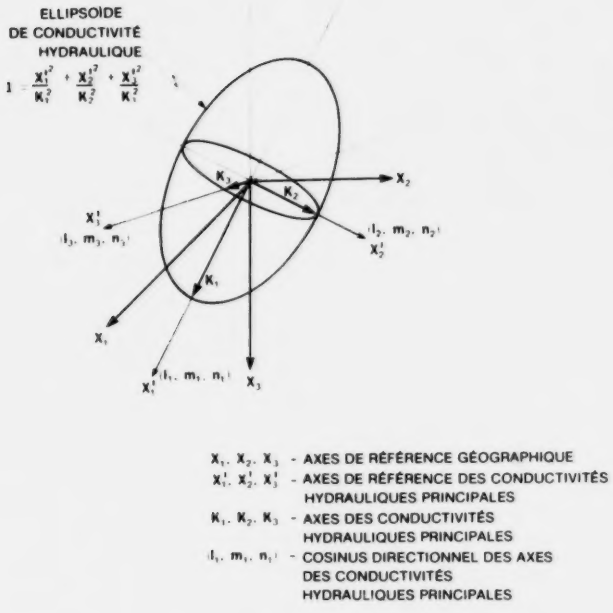


Figure 38. Ellipsoïde de conductivité hydraulique et axes de référence dans trois directions.

intervalles d'essais ne renfermant que quelques fractures orientées toutes dans la même direction. Vu le nombre de fractures et la diversité d'orientation, (figures 8 et 9), les rapports relativement faibles d'anisotropie s'expliquent très bien. Il est cependant important de remarquer que les conductivités hydrauliques principales, illustrées à l'annexe D, ne tiennent pas compte de l'effet significatif de fractures individuelles à perméabilité élevée, telles que les fractures des zones de fractures nos 1, 2, 3 et 4. L'effet de ces fractures à perméabilité élevée est équilibré par la présence de fractures moins perméables situées dans les intervalles d'essai isolés par des packers.

Les ellipsoïdes de conductivité hydraulique, calculés pour chacun des intervalles d'essai (annexe D), ont généralement une forme sphéroïdale à sphéroïdale aplatie. Lorsque les rapports d'anisotropie s'accroissent, les sphéroïdes s'aplatissent puisque la conductivité hydraulique principale (axe mineur) K_3 diminue. En général, peu importe le rapport d'anisotropie, les conductivités hydrauliques K_1 et K_2 sont semblables pour chacun des intervalles d'essai. Chaque plan de conductivité hydraulique peut donc être défini en partie par les principales conductivités hydrauliques : axe majeur (K_1) et axe intermédiaire (K_2). La moyenne géométrique et l'orientation du principal plan de conductivité hydraulique K_1K_2 ont été utilisées pour comparer des ellipsoïdes de conductivité hydraulique sur des diagrammes stéréographiques.

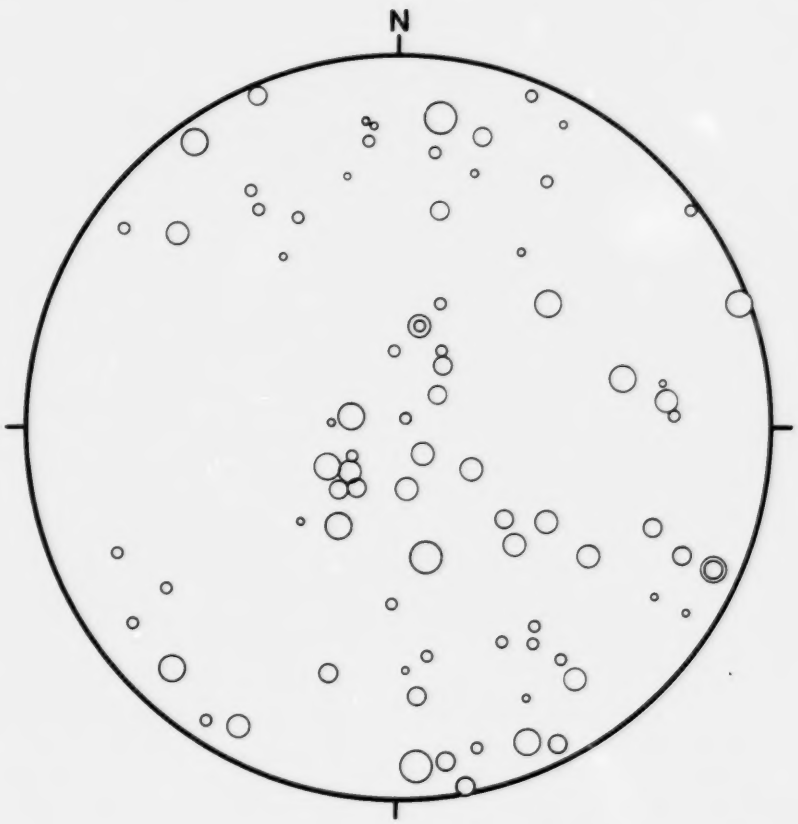
Les plans des principales conductivités hydrauliques K_1, K_2 ou axes K_3 sont cartographiés à la figure 39. L'importance de la moyenne géométrique sur le plan K_1K_2 a été représentée par des cercles à diamètre variable pour chacun des pôles. Les diamètres des cercles sont proportionnels aux logarithmes à base 10 de la moyenne géométrique du plan K_1K_2, calculés en mètres par seconde.

La figure 39 montre que l'orientation des plans des principales conductivités hydrauliques sont très dispersées. Néanmoins, un certain regroupement des pôles K_3 apparaissent sur le diagramme stéréographique, suggérant des directions préférées de perméabilité dans la masse rocheuse à l'échelle du site à l'étude. L'examen visuel de la figure 39 montre que la perméabilité est supérieure dans les plans suivants : subhorizontal, à orientation est-nord-est et à forte inclinaison vers le nord-ouest; dans une moindre mesure, à orientation est-sud-est et à inclinaison abrupte vers le sud-ouest. Ces directions de perméabilité supérieure correspondent à l'orientation de trois séries principales de fractures parallèles identifiées lors des mesures dans les trous de sondage (figure 8 et tableau 3). Cette correspondance n'est pas étonnante étant donné que les anisotropies des tenseurs de conductivité hydraulique sont déterminées à partir de l'orientation des fractures dans les trous de sondage. Le grand nombre de pôles par rapport au plan des principales conductivités hydrauliques K_1/K_2 regroupées au centre du diagramme comparativement au diagramme polaire des fractures (figure 8) indiquerait que les fractures subhorizontales présenteraient des ouvertures plus larges que celles des séries de fractures parallèles subverticales. Les perméabilités plus élevées dans le plan horizontal pourraient cependant résulter également d'un biais d'orientation. La correction de Terzaghi pour le biais d'orientation n'a pas été utilisée pour le calcul des tenseurs de perméabilité pour chacun des intervalles d'essais.

Il est difficile d'évaluer la fiabilité des tenseurs de conductivité hydraulique déterminés à partir du modèle orientation-ouverture des fractures. La moyenne géométrique de l'ellipsoïde de la conductivité hydraulique, soit $(K_1K_2K_3)^{1/3}$, pour chacun des intervalles d'essais est certainement, comme prévu, presque identique à la conductivité hydraulique équivalente de la masse rocheuse (K_{erm}) déterminée à partir des essais d'injection (tableau 6). Afin d'évaluer la fiabilité de ce modèle, il faut cependant mesurer indépendamment les propriétés de conductibilité hydraulique de la masse rocheuse.

La réponse verticale dans la masse rocheuse au pompage de la zone de fractures no 1 donne une estimation indépendante des propriétés d'écoulement vertical de la masse rocheuse qui pourra être comparée aux résultats du modèle orientation-ouverture des fractures. La comparaison

n'est cependant pas simple et directe. La diffusivité hydraulique verticale (voir section «Propriétés d'écoulement vertical dans la masse rocheuse») est déterminée à partir de la mesure des réponses verticales, alors que la conductivité hydraulique verticale est calculée à partir du modèle. Il faut estimer l'emmagasinement spécifique, S_S pour pouvoir calculer la conductivité hydraulique verticale à partir de la diffusivité hydraulique verticale. Afin de résoudre cette difficulté, nous avons rapporté la diffusivité hydraulique verticale κ_V, calculée à partir des réponses au pompage d'essai (tableau 6), en fonction de la conductivité hydraulique verticale K_V déterminée à partir du modèle orientation-ouverture des fractures (figure 40). Il est nécessaire d'effectuer certaines moyennes afin de pouvoir comparer la diffusivité hydraulique, mesure des propriétés d'écoulement vertical entre des intervalles



PÔLES PERPENDICULAIRES AU PLAN PRINCIPAL DE CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE K_1K_2. PROJECTION À AIRES ÉQUIVALENTES SUR L'HÉMISPHÈRE INFÉRIEUR

LOGARITHME DE LA MOYENNE GÉOMÉTRIQUE DES AXES DES PRINCIPALES CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES K_1K_2 EN m/s : Log (K_1K_2) ?

- < −9.0
- −9.0 - −8.0
- −8.0 - −7.0
- −7.0 - −6.0
- −6.0 - −5.0
- > −5.0

Figure 39. Diagramme stéréographique des pôles perpendiculaires au plan principal de conductivité hydraulique K_1, K_2 pour les intervalles d'essai FS. Les tenseurs de conductivité hydraulique ont été déterminés à partir de diagraphies de fractures enregistrées par image acoustique, et à partir des données des essais d'injection.

d'essai FS, et la conductivité hydraulique, calculée pour chacun des intervalles d'essai FS. Ainsi, la moyenne harmonique des conductivités hydrauliques verticales a été déterminée entre les intervalles d'essai FS à des fins de comparaison avec la diffusivité verticale de la figure 40. La figure 40 illustre également des lignes qui représentent la variation des emmagasinements spécifiques nécessaires pour que les valeurs de diffusivité hydraulique soient égales aux estimations de conductivité hydraulique. La plupart des points de données sont situées entre les lignes d'emmagasinement spécifiques de 10^{-6} à 10^{-4}, mais avec une dispersion significative. La valeur centrale ou moyenne d'emmagasinement spécifique est d'environ 10^{-5}. L'étalement des données est semblables pour les intervalles d'essais situés près de zones de fractures à perméabilité élevée (soit la zone de fractures nº 4) et pour des intervalles d'essais situés dans une roche fracturée plus uniformément.

Les gammes des emmagasinements spécifiques nécessaires pour qu'il y ait équivalence entre les valeurs de diffusivité et de conductivité hydrauliques correspondent aux valeurs d'emmagasinement déterminées à partir des autres essais d'interférence hydraulique. Les essais d'interférence effectués dans les zones de fractures nºs 1, 2, 3 et 4 ont révélé des propriétés d'emmagasinage de 10^{-4} à 10^{-6} et une valeur moyenne de 10^{-5} (voir résultats de la section «Essais d'interférence hydraulique»). Pour ces zones de fractures, la largeur réelle est égale à l'unité et les propriétés d'emmagasinage sont donc égales aux valeurs d'emmagasinement spécifiques.

Les simulations numériques à deux dimensions d'un écoulement d'eaux souterraines à l'équilibre (Raven et coll., 1985) dans des conditions transitoires sur le site à l'étude ont été comparées à des données de hauteurs piézométriques mesurées sur le terrain afin d'évaluer la fiabilité des propriétés hydrauliques déterminées par le modèle orientation-ouverture des fractures. Les résultats de la modélisation de l'écoulement à l'équilibre indiqueraient que ce modèle permet d'obtenir des estimations raisonnables de la conductivité hydraulique anisotrope pour la couche supérieure (30 m d'épaisseur) de la masse rocheuse mais surestiment la conductivité hydraulique sous cette profondeur. La modélisation de l'écoulement souterrain en condition transitoire a indiqué qu'une valeur d'emmagasinement spécifique moyenne de 10^{-5} permettait de bien décrire la variation du rabattement dans la masse rocheuse au-dessus de la zone de fractures nº 1.

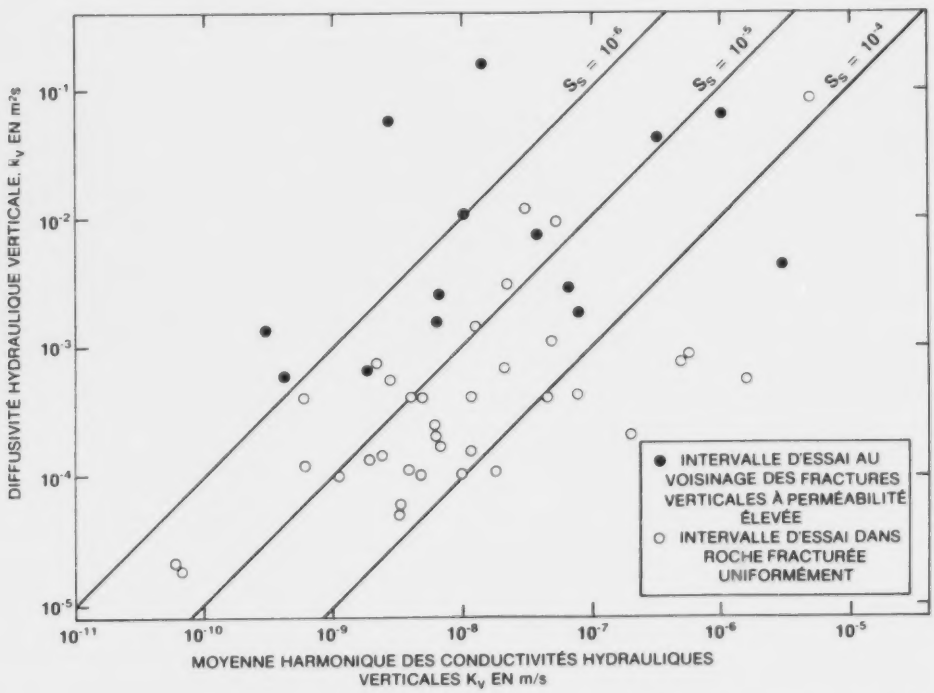


Figure 40. Graphique illustrant la moyenne harmonique des conductivités hydrauliques verticales calculée à partir du modèle orientation-ouverture des fractures en fonction de la diffusivité hydraulique verticale déterminée à partir des essais de pompage. Les lignes représentent les valeurs d'emmagasinement spécifiques nécessaires pour que la conductivité hydraulique verticale soit égale à la diffusivité hydraulique verticale.

En résumé, le modèle orientation-ouverture des fractures utilisé ici semble, d'après des mesures indépendantes des propriétés hydrauliques et des simulations numériques, fournir une description adéquate des conductivités hydrauliques anisotropes de masses rocheuses uniformément fracturées au-dessus de la profondeur de 30 m. Ce modèle est moins fiable pour décrire les propriétés d'écoulement verticales d'une masse rocheuse coupée par des zones verticales de fractures à perméabilité élevée et étudiée par des trous de sondage verticaux. Il semblerait cependant (figure 40) que ce modèle puisse fournir une estimation fiable des conductivités hydrauliques verticales plus élevées résultant de la présence de fractures verticales près des trous de sondage de l'étude.

SOMMAIRE

Les caractéristiques hydrauliques d'un bloc de gneiss monzonitique fracturé de 200 m par 150 m par 50 m de profondeur ont été mesurées par des techniques en surface et de sondage dans le cadre d'une étude des systèmes d'écoulement d'eau souterraine dans une roche fracturée. Les méthodes de levés en surface et de sondages comprenaient l'analyse d'arrangements structuraux par photographie aérienne et par des méthodes géophysiques, la cartographie et la diagraphie de fractures, des essais d'injection et d'interférence, et des mesures des hauteurs piézométriques. L'interprétation de tous ces résultats a permis d'obtenir une image tridimensionnelle du système d'écoulement souterrain à Chalk River. Ces examens ont également fourni des renseignements fondamentaux sur les systèmes d'écoulement souterrains dans des roches fracturées et ont permis de déterminer l'utilité de diverses techniques pour définir ces systèmes.

Les résultats des études résumées par le présent rapport indiquent que les caractéristiques structurales importantes, par exemple les failles, les dykes, etc. des zones de fractures jouent un important rôle de régulation des systèmes d'écoulement dans une roche fracturée. L'étude des LNCR a montré que les importantes discontinuités structurales avaient les comportements hydrauliques suivants : 1) court-circuitage des trajectoires d'écoulement souterrain (zone de fractures nº 4), 2) limites imperméables d'écoulement souterrain (dykes de diabase); 3) limites à potentiel constant de l'écoulement souterrain (zone de fractures nº 1). À cause de leur signification hydrogéologique, l'identification des principales discontinuités structurales est importante dans le cadre de toute étude hydrogéologique détaillée. L'analyse par photographie aérienne des arrangements structuraux, les examens géophysiques électromagnétiques à très basse fréquence au sol et aériens et la cartographie de la surface ont permis d'identifier et de prévoir la présence de discontinuités structurales souterraines principales. Chacune des importantes discontinuités structurales obliques, à pendage abrupt, traversées par des trous de sondage, a également été identifiée à l'aide de ces techniques. Les zones de fracture subhorizontales traversées par des trous de sondage n'ont pas été détectées à partir des études à la surface.

Les propriétés d'écoulement des blocs rocheux, définies par d'importantes discontinuités structurales, résultent de l'interconnexion de fractures discontinues plus petites. La détermination des propriétés statistiques de ce système de fractures est importante pour pouvoir estimer les propriétés hydrauliques et interpréter les essais hydrauliques. Diverses méthodes de détermination des propriétés du système de fractures ont été utilisées avec succès sur le site des LNCR. La cartographie des fractures de surface par des lignes d'exploration a permis d'identifier toutes les principales séries de fractures parallèles obliques jusqu'à des profondeurs de 50 m. Les levés par image et par récepteur acoustique ont permis d'identifier toutes les séries principales de fractures parallèles, obliques et horizontales. Le récepteur acoustique a démontré des capacités supérieures de détection des fractures dans les roches mafiques ou foncées.

L'analyse détaillée des données d'orientation de fractures mesurées dans trois sous-zones a révélé que le système de fractures n'est pas homogène statistiquement à l'échelle du site à l'étude. Cette variation spatiale des caractéristiques des fractures est liée en partie à la présence ou l'absence d'importantes discontinuités structurales dans les différentes sous-zones. Cette non-homogénéité des caractéristiques des fractures à l'échelle du site indiquerait que divers paramètres ou distribution de paramètres seront nécessaires afin de pouvoir modéliser de façon fiable le site des LNCR par l'utilisation des méthodes de modélisation de l'écoulement en milieu poreux équivalent ou dans des fractures discrètes et stochastiques. L'analyse des données des fractures de trous de sondage individuels (Lau et coll., 1984) indique que les dimensions adéquates pour discrétiser ou déterminer les propriétés de l'écoulement, aux fins de l'utilisation des modèles à milieu poreux équivalent, sont probablement inférieures à une longueur caractéristique déterminée par l'espacement moyen des trous de sondage (25 à 50 m). Pour les tenseurs de conductivité hydraulique déterminés à la section 9, les longueurs caractéristiques, définies à partir de l'emplacement des packers dans les tubages, variaient entre 3 et 13 m.

Les essais d'injection effectués dans les trous de sondage uniques et les essais d'interférence effectués dans des trous de sondage multiples ont été très utiles pour définir les propriétés hydrauliques de la masse rocheuse. Les essais d'injection fournissent des renseignements fiables,

d'une manière peu coûteuse, sur la conductivité hydraulique de la masse rocheuse au voisinage immédiat des trous de sondage. Les essais d'interférence, plus difficiles à effectuer et à interpréter, fournissent des renseignements sur les propriétés hydrauliques entre les trous de sondage. Il faut planifier avec grand soin les essais d'interférence en vue de minimiser l'effet des conditions limites près et loin du trou de sondage sur la réponse hydraulique entre les trous.

Un modèle orientation-ouverture des fractures a servi à intégrer les données sur l'orientation des fractures et les données résultant des essais d'injection, et à calculer un tenseur de conductivité hydraulique pour chacun des intervalles d'essai FS. Les tenseurs de conductivité hydraulique calculés grâce au modèle ne sont pas fortement anisotropes. De même, d'après des simulations de modèles numériques et des essais hydrauliques indépendants, ces tenseurs de conductivité semblent fournir une estimation raisonnable des propriétés hydrauliques de la masse rocheuse au-dessus de la profondeur de 30 m aux LNCR; sous la profondeur de 30 m, le modèle surestimerait la conductivité hydraulique.

Les résultats des essais hydrauliques, des diagraphies de fractures et des mesures de la hauteur piézométrique indiquent la présence d'un système d'écoulement d'eau souterraine simple contrôlé par la gravité sur le site à l'étude. L'écoulement dans ce système est essentiellement vertical vers une zone de fractures à faible hauteur piézométrique (n^{o} 1), située entre 33 et 50 m de profondeur. La composante horizontale de l'écoulement est dirigée vers le nord-ouest et reflète la topographie de surface. Un dyke de diabase, d'orientation est-ouest, forme une limite sud imperméable au système d'écoulement. L'emplacement de la zone de fractures à hauteur piézométrique peu élevée, du dyke de diabase et des trous de sondage du site à l'étude est illustré à la figure 41. L'emplacement et l'orientation de la zone de fractures n^{o} 1, illustrés à la figure 41, ont été déterminés à partir de neuf intersections de trous de sondage et de divers essais d'interférence hydraulique. Les hauteurs piézométriques dans la zone de fractures n^{o} 1 et la plupart des intervalles d'essais de profondeur intermédiaire à grande, semblent être régis par une zone verticale de fractures (n^{o} 4) reliée à un marécage situé au nord-ouest du site à l'étude.

Quatre importantes zones de fractures à perméabilité élevée (n^{o} 1 à n^{o} 4) ont été identifiées sur le site à l'étude. L'emplacement des zones de fractures n^{os} 2, 3 et 4 et des trous de sondage du site à l'étude est illustré à la figure 42. Les zones de fractures n^{o} 1 et n^{o} 3, et des portions de la zone de fractures n^{o} 2, sont caractérisées par une perméabilité élevée et la présence de minces (épaisseur <1 m) couches mafiques dans le gneiss monzonitique. Ces zones mafiques sont de toute évidence des caractéristiques hydrogéologiques importantes au site à l'étude des LNCR.

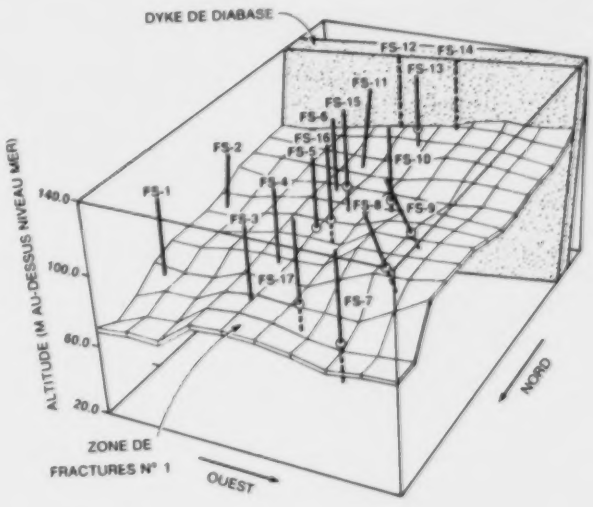


Figure 41. Diagramme isométrique du site de l'étude de l'écoulement des eaux souterraines des LNCR illustrant l'emplacement des trous de sondage d'essai, de la zone de fractures n^{o} 1 et du dyke de diabase.

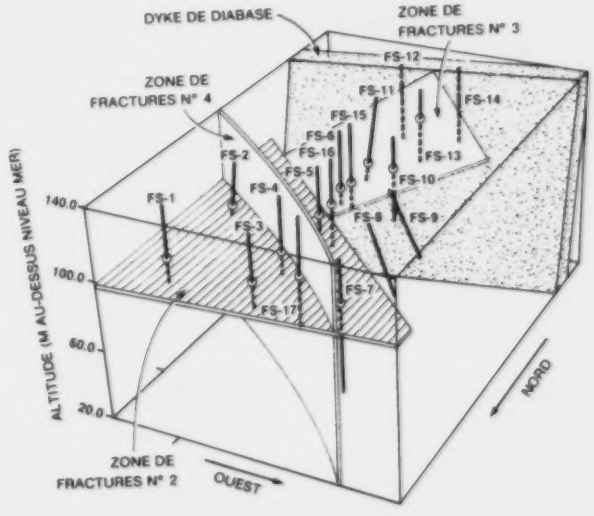


Figure 42. Diagramme isométrique du site de l'étude de l'écoulement des eaux souterraines des LNCR illustrant l'emplacement des trous de sondage d'essai, des zones de fractures n^{os} 2, 3 et 4 et du dyke de diabase.

Les résultats de la présente étude indiqueraient également que des fractures verticales non détectées pourraient jouer un rôle important dans la régulation de l'écoulement à l'intérieur du système peu profond au LNCR. Les essais d'interférence hydraulique effectués en vue de mesurer la diffusivité hydraulique verticale indiquent la présence de fractures verticales et de zones de fractures (zones nº 4). Cette capacité de détection des fractures verticales aux LNCR est cependant limitée par l'orientation dominante des trous de sondage, qui varie de la verticale à une inclinaison abrupte. Toute étude future devrait prévoir le forage d'un plus grand nombre de trous de sondage inclinés malgré les difficultés de forage, des examens diagraphiques et des essais dans des trous obliques.

RÉFÉRENCES

Argarwal, R.G., R. Al-Hussiany, et H.J. Ramey, Jr. 1970. An investigation of wellbore storage and skin effect in unsteady liquid flow. 1. Analytical treatment. Soc. Pet. Eng. J. 10(3): 279-290.

Bianchi, L., et D.T. Snow. 1969. Permeability of crystalline rock interpreted from measured orientations and apertures of fractures. Ann. Arid Zone, 8(2): 231-245.

Brown, P.A., et N.A.C. Rey. 1984. Geologic and structural conditions at Chalk River. Proc. Workshop on Geophysical and Related Geoscientific Studies at Chalk River, Décembre, Préparé par M.D. Thomas et D.F. Dixon. Sous presse.

Brown, P.A., et R.H. Thivierge. 1977. General geology, fracturing and drill site selection – LNCR. Com. géol. du Can. Rapport non publié GD. PR. 817.

Cooper, H.H., Jr., et C.E. Jacob. 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. Trans. Am. Geophys. Union, 27: 526-534.

Dence, M.R., et W.J. Scott. 1980. The Use of Geophysics in the Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program with Examples from the Chalk River Research Area. Én. atom. du Can. Ltée. Technical Record, TR-102.[1]

Earlougher, R.C., Jr. 1977. Advances in well test analysis. Soc. Pet. Eng. of AIME Special Monograph, Volume 5.

Gale, J.E. 1977. Étude numérique sur le terrain et au laboratoire de l'écoulement des fluides dans un système de fractures déformables. Étude nº 72, Série scientifique. Institut national de recherche en hydrologie, Direction générale des eaux intérieures, Environnement Canada, Ottawa.

Gale, J.E., C. Forster, et R. Nadon. 1979. Permeability of fractured low-permeability rocks. Final Report to Lawrence Berkeley Laboratory, Waterloo Research Institute Project No. 803-12, University of Waterloo, Waterloo (Ontario).

Gringarten, A.C. 1982. Flow-test evaluation of fractured reservoirs. In Geol. Soc. Am. Special Pap. 189, Recent Trends in Hydrogeology, p. 237-263.

[1] Les rapports techniques d'Énergie atomique du Canada Limitée sont des rapports non publiés disponibles auprès du Bureau de distribution, des documents scientifiques de la Société de recherche d'Énergie atomique du Canada Limitée, Chalk River (Ontario) K0J 1J0.

Gringarten, A.C., et H.J. Ramey, Jr. 1974. Unsteady-state pressure distributions created by a well with a single horizontal fracture, partial penetration, or restricted entry. Soc. Pet. Eng. J. 14(4): 413-426.

Gringarten, A.C., H.J. Ramey, Jr., et R. Raghavan. 1972. Pressure analysis for fractured wells. Soc. Pet. Eng. Pap. 4051 presented SPE AIME 47th annual meeting, San Antonio, Texas, Octobre.

Hanshaw, B.B., et J.D. Bredehoeft. 1968. On the maintenance of anomalous fluid pressures. II. Source layer at depth. Geol. Soc. Am. Bull. 79: 1107-1122.

Hirasaki, G.J. 1974. Pulse tests and other early transient pressure analyses for in situ estimation of vertical permeability. Soc. Pet. Eng. J. Trans. 257: 75-90.

Hurst, W. 1953. Establishment of the skin effect and its impediment to fluid flow in a wellbore. Pet. Eng. 25: B-6.

Hvorslev, M.J. 1951. Time lag and soil permeability in groundwater observations. Bull. 36, Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps Eng., Vicksburg, Mississippi.

Jargon, J.R. 1976. Effect of wellbore storage and wellbore damage at the active well on interference test analysis. J. Pet. Technol., p. 851-858.

Lau, J.S.O. 1980. Borehole Television Survey, Underground Rock Engineering, CIM Special Volume 22, p 204-210.

Lau, J.S.O., L.F. Auger, et J.G. Bisson. 1984. Borehole television survey and acoustic televiewer logging at the National Hydrology Research Institute's hydrogeologic test site at Chalk River. Proc. Workshop on Geophysical and Related Geoscientific Studies of Chalk River, Préparé par M.D. Thomas et D.F. Dixon. Sous presse.

Lumbers, S.B. 1974. Precambrian geology, Mattawa – Deep River Area, District of Nipissing and County of Renfrew. Ministère des Mines de l'Ontario. Miscellaneous Pap. 59.

Neuman, S.P., et P.A. Witherspoon. 1972. Field determination of the hydraulic properties of leaky multiple aquifer systems. Water Resour. Res. 8(5): 1284-1298.

Papadopulos, I.S., et H.H. Cooper, Jr. 1967. Drawdown in a well of large diameter. Water Resour. Res. 3(1): 241-244.

Priest, S.D., et J.A. Hudson. 1981. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. 18, p. 183-197.

Raghavan, R. 1977. Pressure behaviour of wells intercepting fractures. Proc. Invitational Well-Testing Symp., 19 au 21 octobre, Berkeley. California, Lawrence Berkeley Laboratory Rep. 7027, p. 117-160.

Ramey, H.J., Jr. 1970. Short time well test data interpretation in the presence of skin effect and wellbore storage. J. Pet. Technol. 22(1): 97-104.

Raven, K.G. 1980. Studies in Fracture Hydrology at Chalk River Nuclear Laboratories: 1977/78/79. Én atom. du Can. Ltée. Technical Record, TR-113.[1]

Raven, K.G., et J.A. Smedley. 1982. CRNL ground water flow study – summary of FY 1981 research activities, non publié Institut national de recherche en hydrologie. Rap. soumis à Énergie atomique du Canada Ltée pour sa publication dans sa série. Technical Record.[1]

Raven, K..G. J.A. Smedley, R.A. Sweezey, et K.N. Novakowski. 1985. Field investigation of a small ground water flow system in fractured monzonitic gneiss. Proc. 17th Int. Assoc. of Hydrogeologists Meeting, Hydrogeology of Rocks of Low Permeability, Tucson, Arizona, 7 au 11 janvier.

Rocha, M., et F. Franciss. 1976. Determination of permeability in anisotropic rock masses from intergral samples. Rock Mech. 9: 67-93.

Rouleau, A. 1984. Statistical characterization and numerical simulation of a fracture system — application to groundwater flow in the Stripa granite. Thèse de Ph.D., University of Waterloo, Waterloo (Ontario).

Scott, W.J. 1984. VLF surveys at Chalk River. Proc. Workshop on Geophysical and Related Geoscientific Studies at Chalk River. Décembre, Préparé par M.D. Thomas et D.F. Dixon, Sous presse.

Sinha, A.K. et J.G. Hayles. 1984. Surface electromagnetic surveys at Chalk River. Proc. Workshop on Geophysical and Related Geoscientific Studies at Chalk River, Décembre, Préparé par M.D. Thomas et D.F. Dixon. Sous presse.

Snow, D.T. 1965. A parallel plate model of fractured permeabile media. Thèse de Ph.D., University of California, Berkeley.

Terzaghi, R.D. 1965. Sources of error in joint surveys. Geotechnique, 15: 287-304.

van Everdingen, A.F. 1953. The skin effect and its influence on the productive capacity of a well. Am. Inst. Min. Eng. Trans. 198: 171-176.

Wolfe, R.G. 1970. Field and laboratory determination of the hydraulic diffusivity of a confining bed. Water Resour. Res. 6(1): 194-202.

Zemanek, J., R.L. Caldwell, E.E. Glen, S.V. Halcomb, L.J. Norton et A.J.D. Strauss. 1969. The borehole televiewer — a new logging concept for fracture location and other types of borehole inspection. J. Pet. Technol. 21: 762-774.

Annexe A
Diagraphies des fractures, Trous de sondage FS-1 à FS-17

ANNEXE A

DIAGRAPHIES DES FRACTURES, TROUS DE SONDAGE FS-1 À FS-17

Les données lithologiques ont été déterminées à partir de fragments échantillonnés à des intervalles de 1.5 m durant le forage des trous de sondage FS-1 à FS-14 et à partir de carottes récupérées dans les trous de sondage FS-15 à FS-17.

Les fractures et les veines identifiées par image des trous de sondage ont été représentées par une ligne droite reliant les points supérieurs et inférieurs de la trace elliptique de la paroi du trou de sondage.

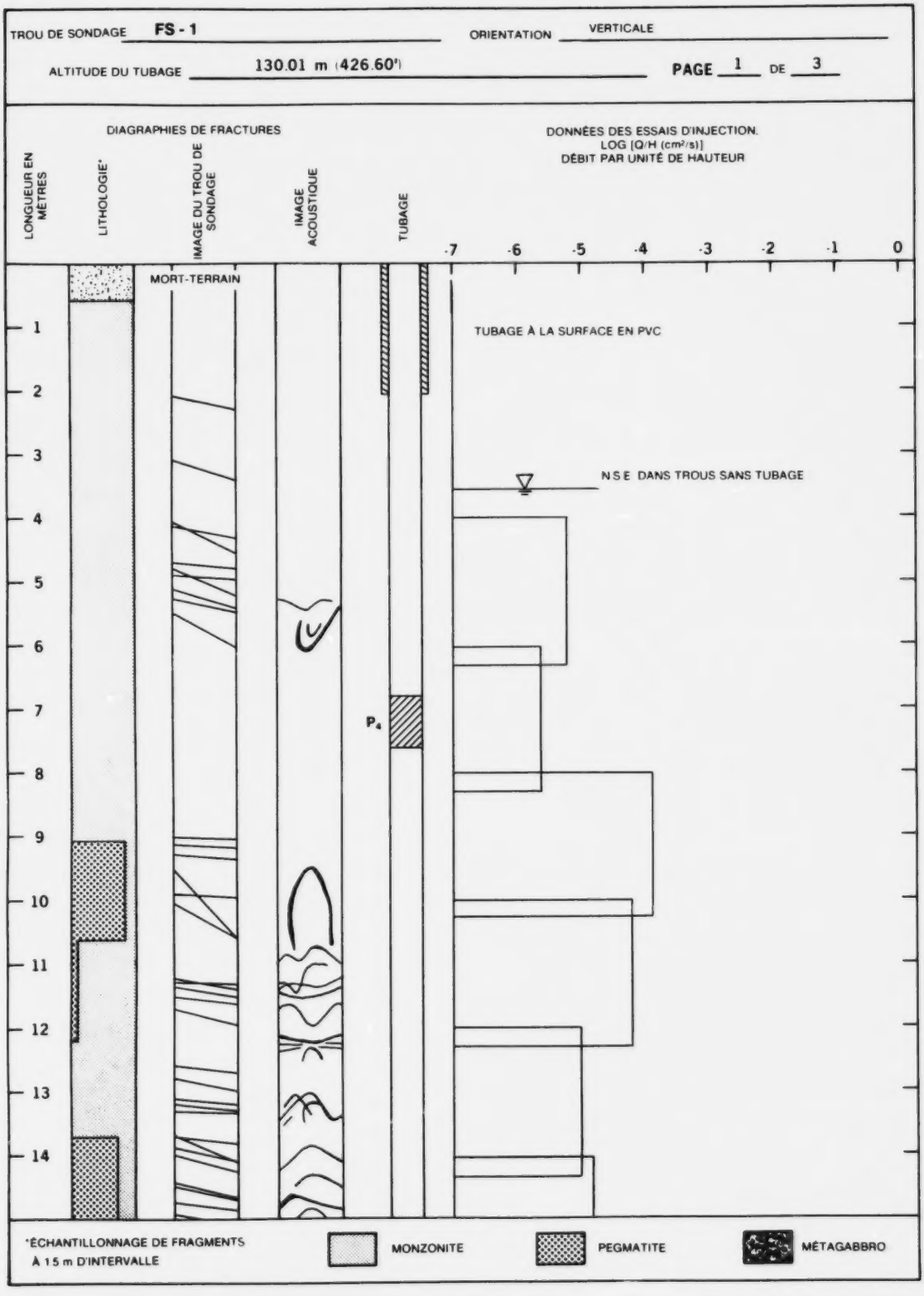
Les fractures et les veines identifiées par image acoustique ont été représentées schématiquement telles qu'elles apparaissaient sur des photographies à 360° de la paroi du trou de sondage à des intervalles de 0.5 m.

Les packers insérés dans les tubages des trous de sondage sont identifiés par P_1, P_2, etc.

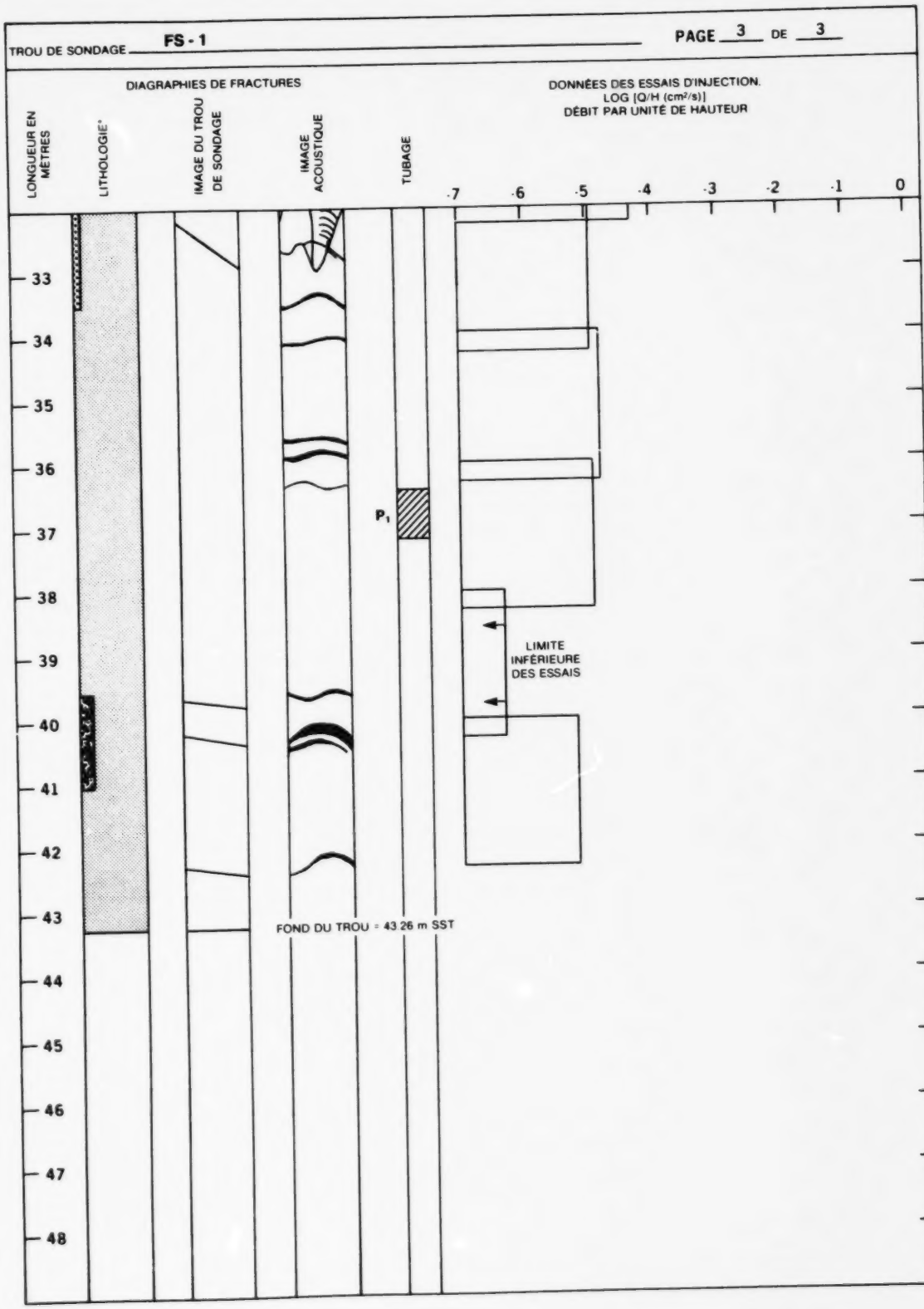
Les données concernant le débit par hauteur unitaire proviennent des essais d'injection à court terme, à packers doubles.

N.S.E. – Niveau statique de l'eau.

S.S.T. – Sous le sommet du tubage.

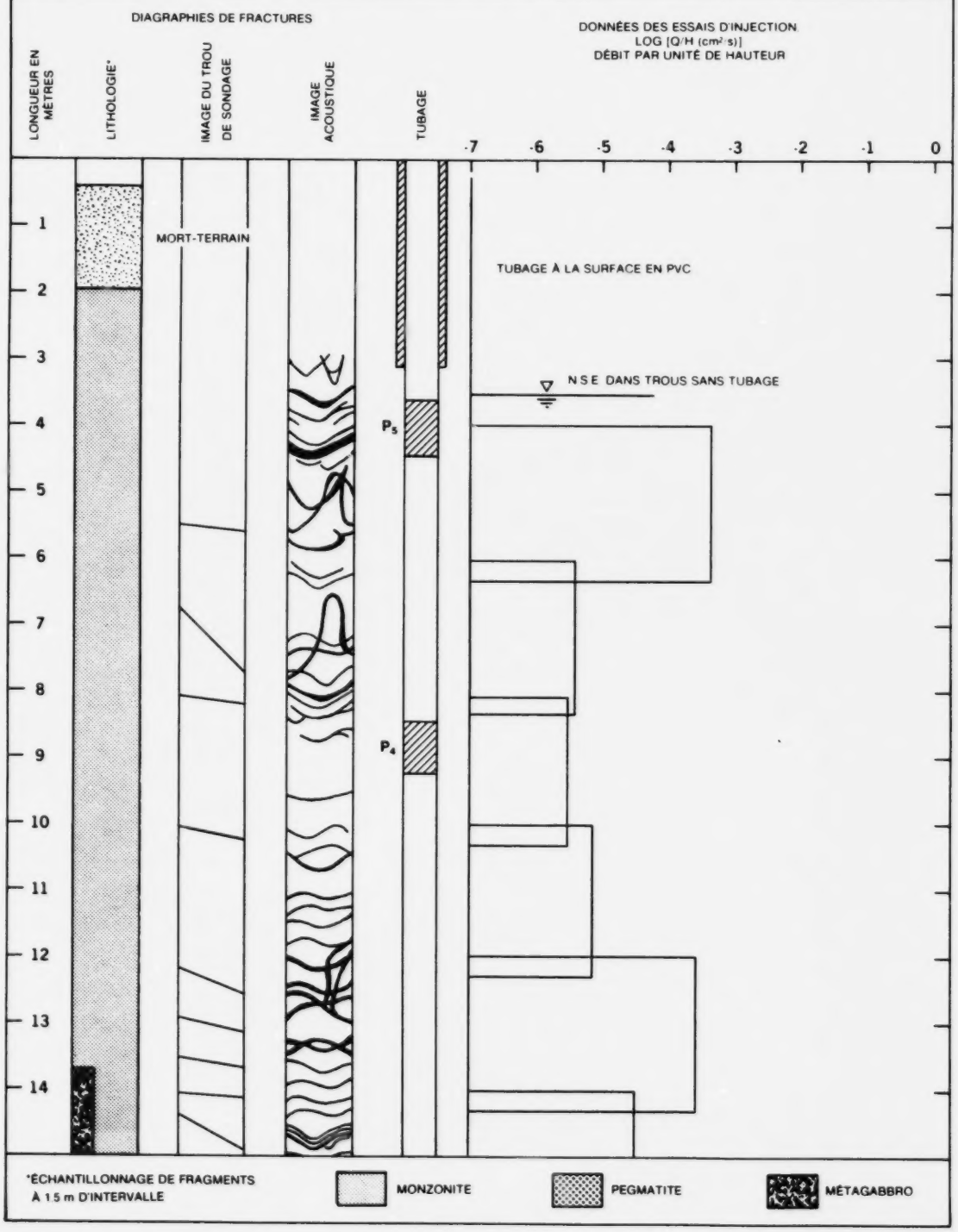

TROU DE SONDAGE FS - 1
ORIENTATION VERTICALE
ALTITUDE DU TUBAGE 130.01 m (426.60')
PAGE 1 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION.
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
MORT-TERRAIN
TUBAGE À LA SURFACE EN PVC
N.S.E. DANS TROUS SANS TUBAGE
P4
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
*ÉCHANTILLONNAGE DE FRAGMENTS À 1.5 m D'INTERVALLE
MONZONITE
PEGMATITE
MÉTAGABBRO

TROU DE SONDAGE FS - 1 PAGE 2 DE 3

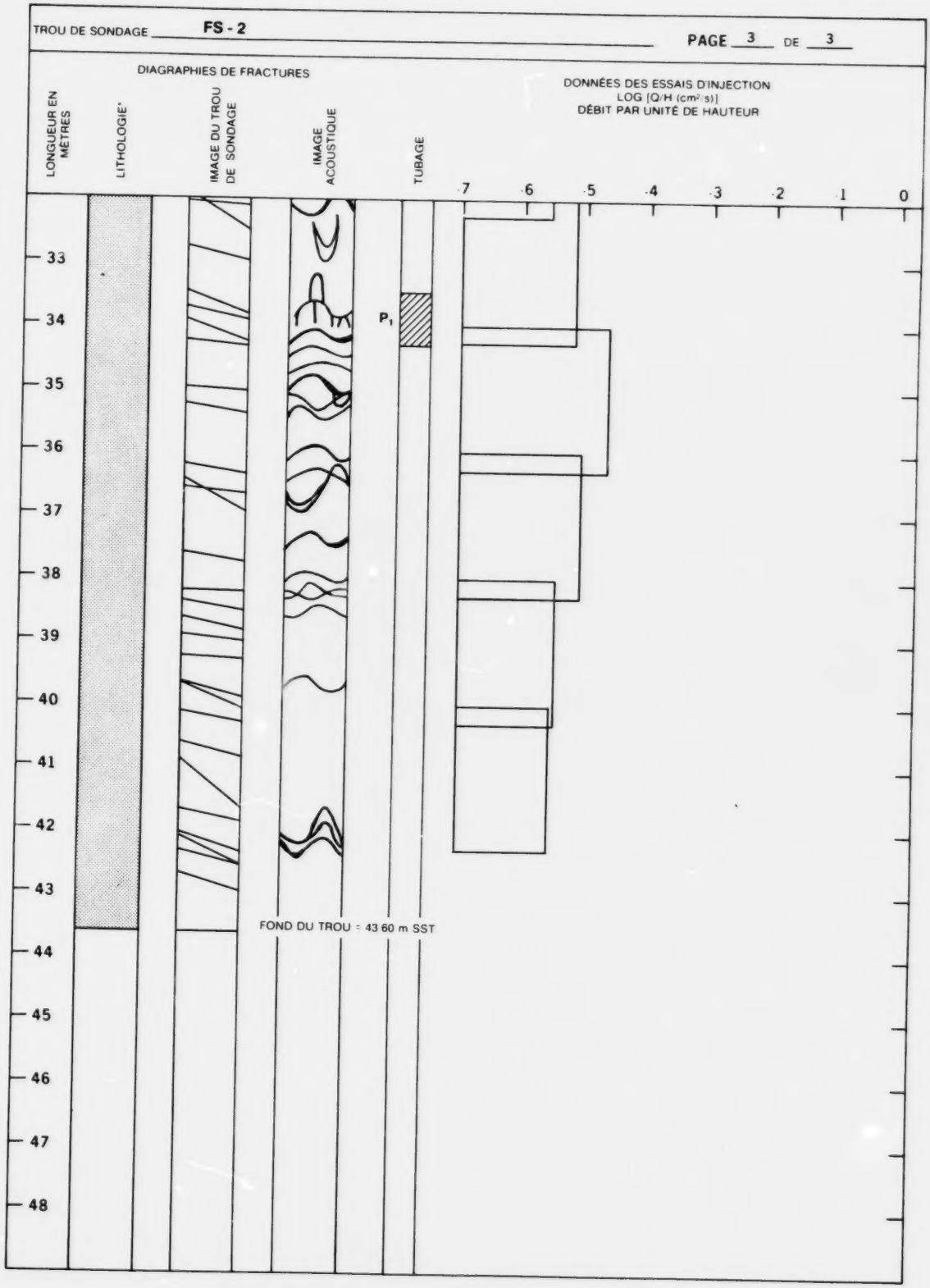

TROU DE SONDAGE FS - 1
PAGE 3 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION.
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
P1
LIMITE INFÉRIEURE DES ESSAIS
FOND DU TROU = 43.26 m SST

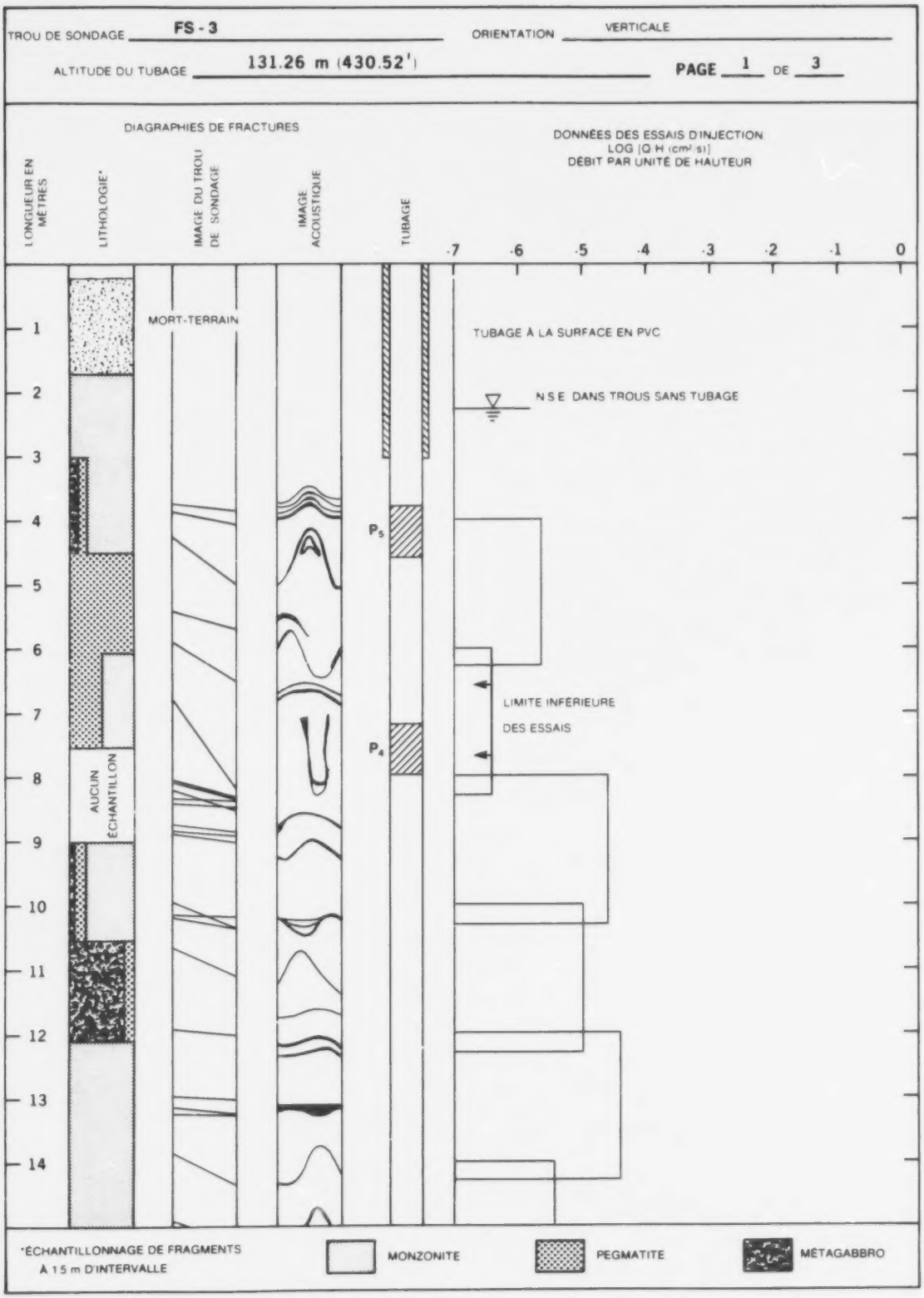
TROU DE SONDAGE FS - 2 ORIENTATION DIRECTION 130° INCLINAISON 65°

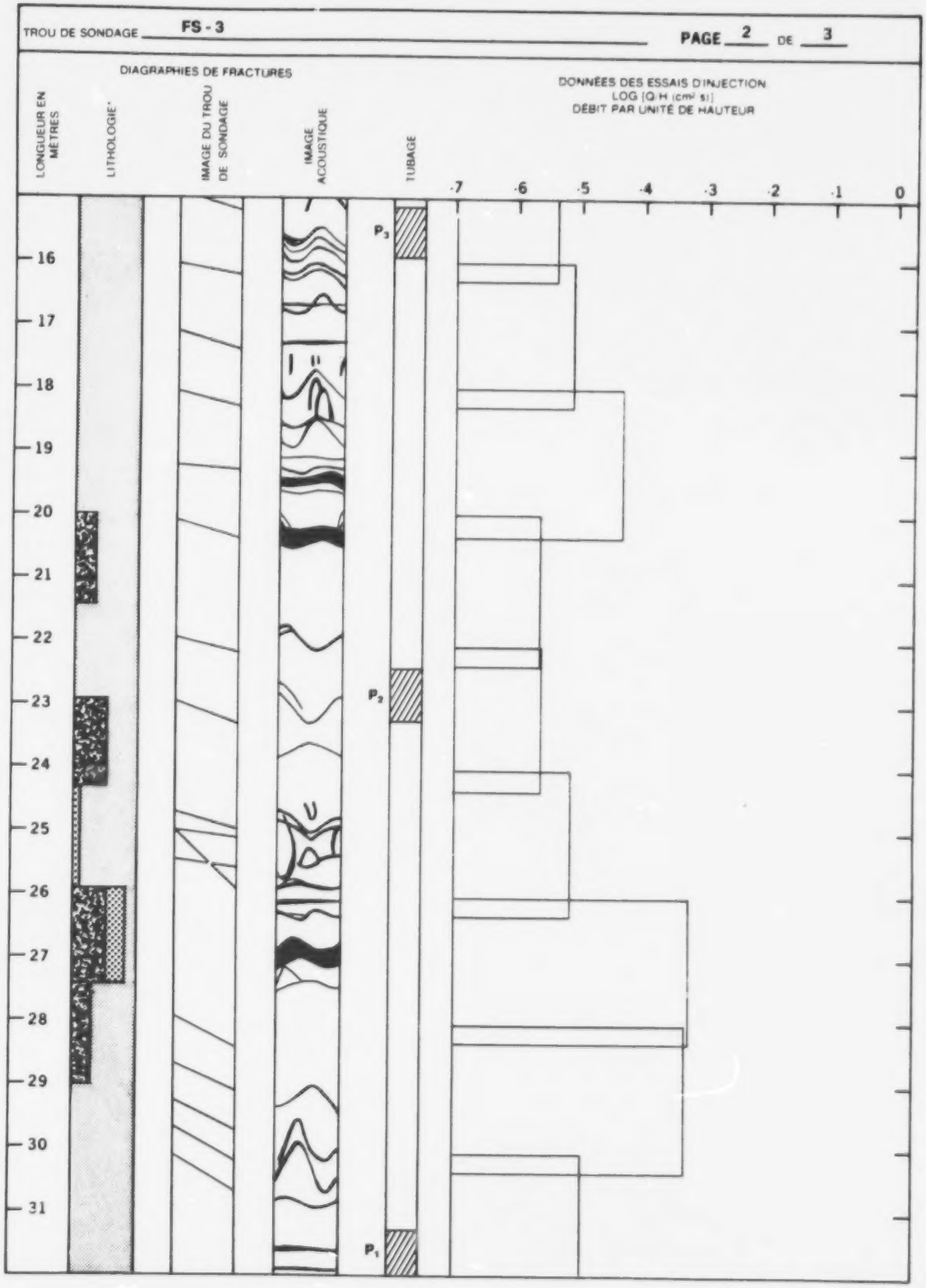
ALTITUDE DU TUBAGE 131.83 m (432.50') PAGE 1 DE 3

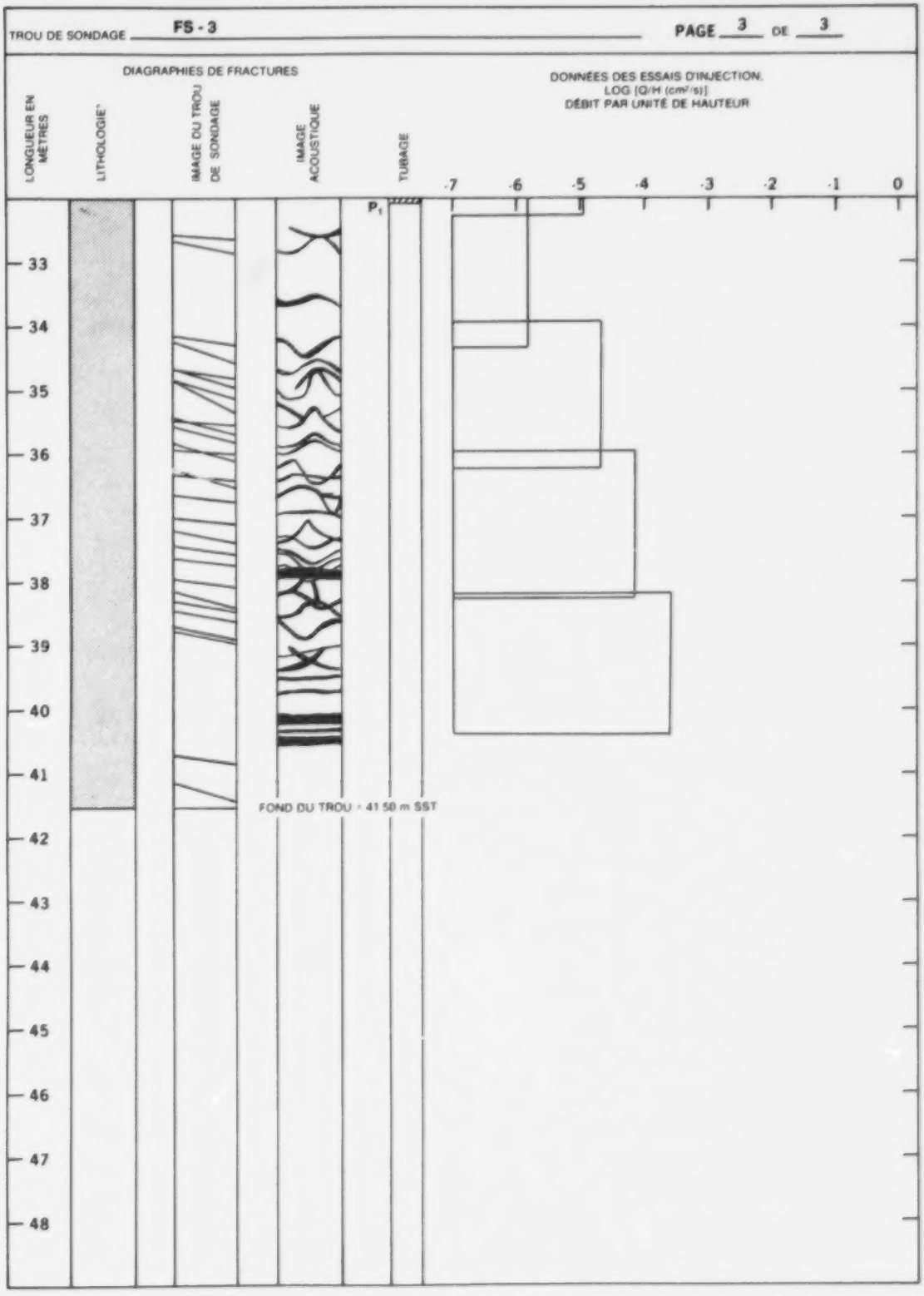


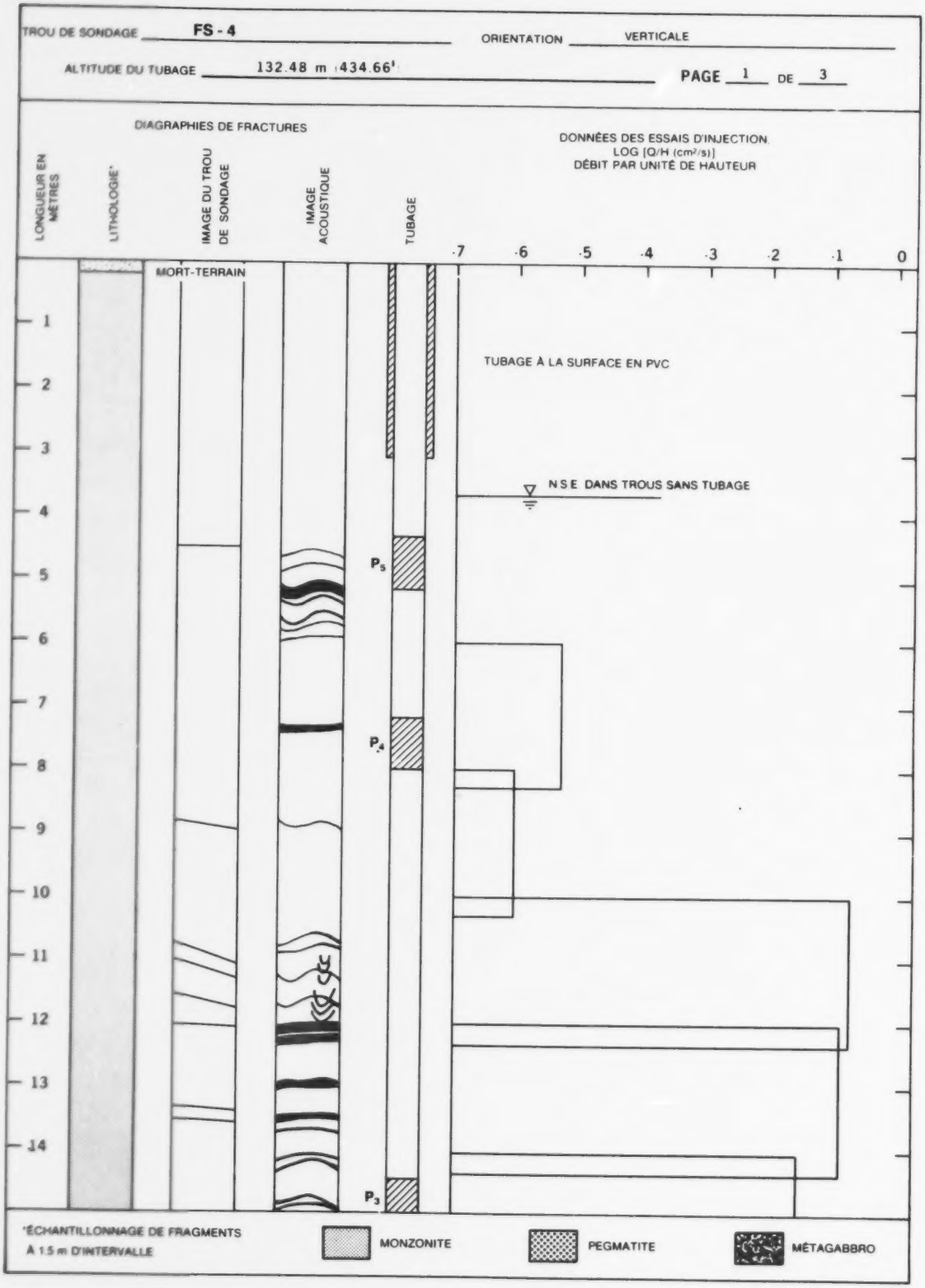
TROU DE SONDAGE FS - 2
PAGE 2 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION.
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
P3
P2
LIMITE INFÉRIEURE
DES ESSAIS

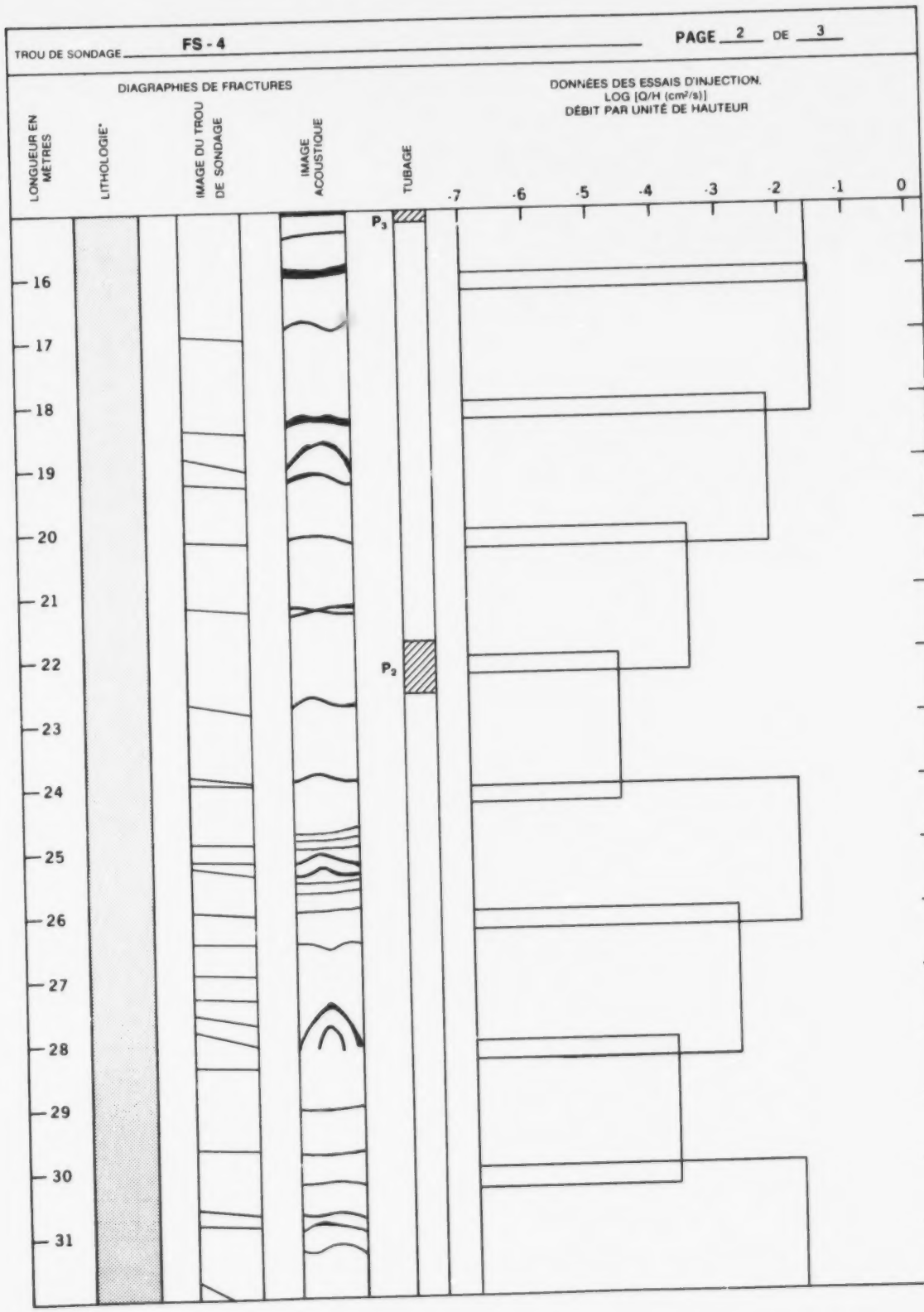

TROU DE SONDAGE FS - 2
PAGE 3 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
P1
FOND DU TROU = 43.60 m SST

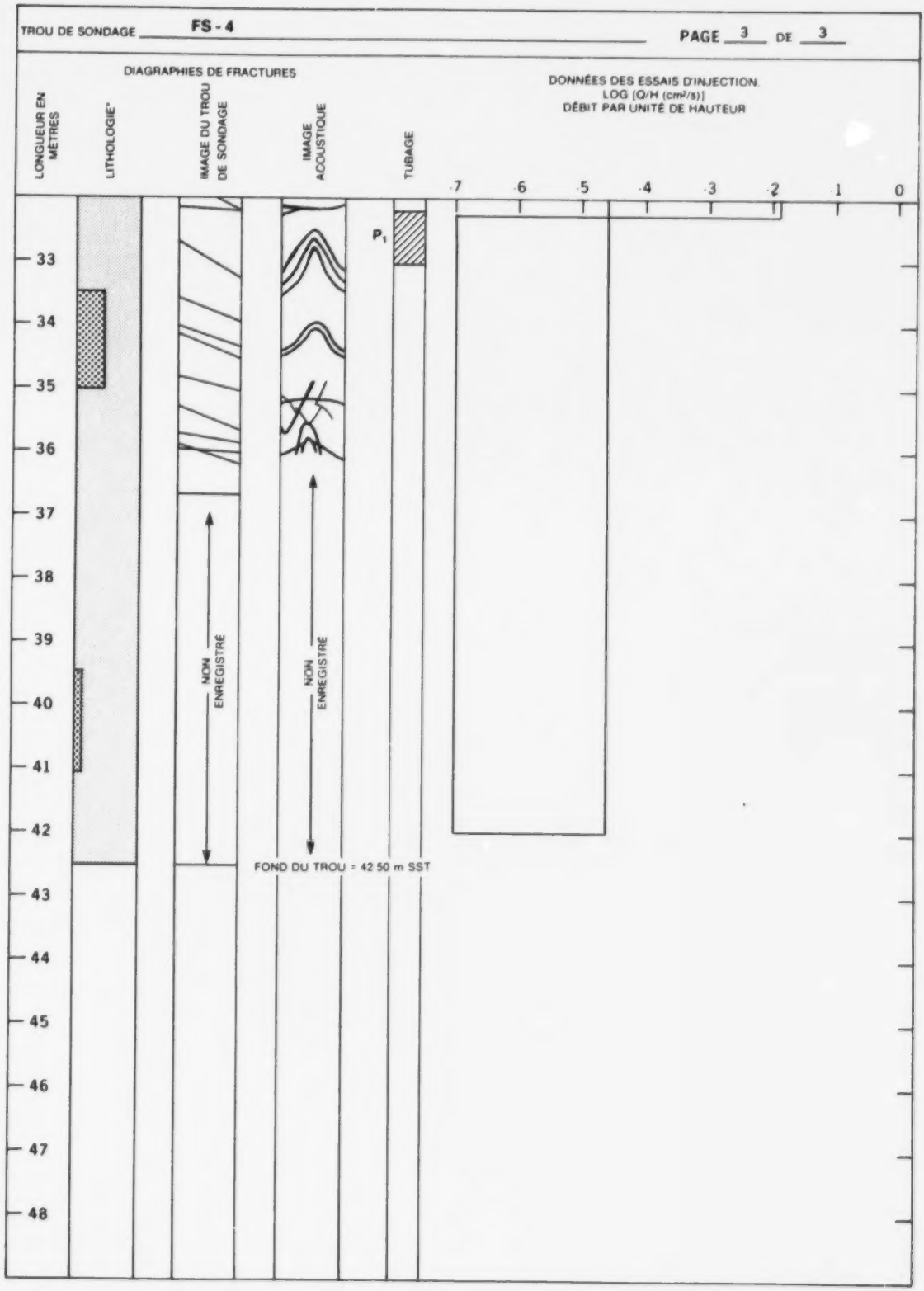

TROU DE SONDAGE FS - 3
ORIENTATION VERTICALE
ALTITUDE DU TUBAGE 131.26 m (430.52')
PAGE 1 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION
LOG [Q H (cm² s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
-7 -6 -5 -4 -3 -2 -1 0
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
MORT-TERRAIN
TUBAGE À LA SURFACE EN PVC
N S E DANS TROUS SANS TUBAGE
P5
P4
LIMITE INFÉRIEURE
DES ESSAIS
AUCUN ÉCHANTILLON
*ÉCHANTILLONNAGE DE FRAGMENTS
À 1.5 m D'INTERVALLE
MONZONITE
PEGMATITE
MÉTAGABBRO

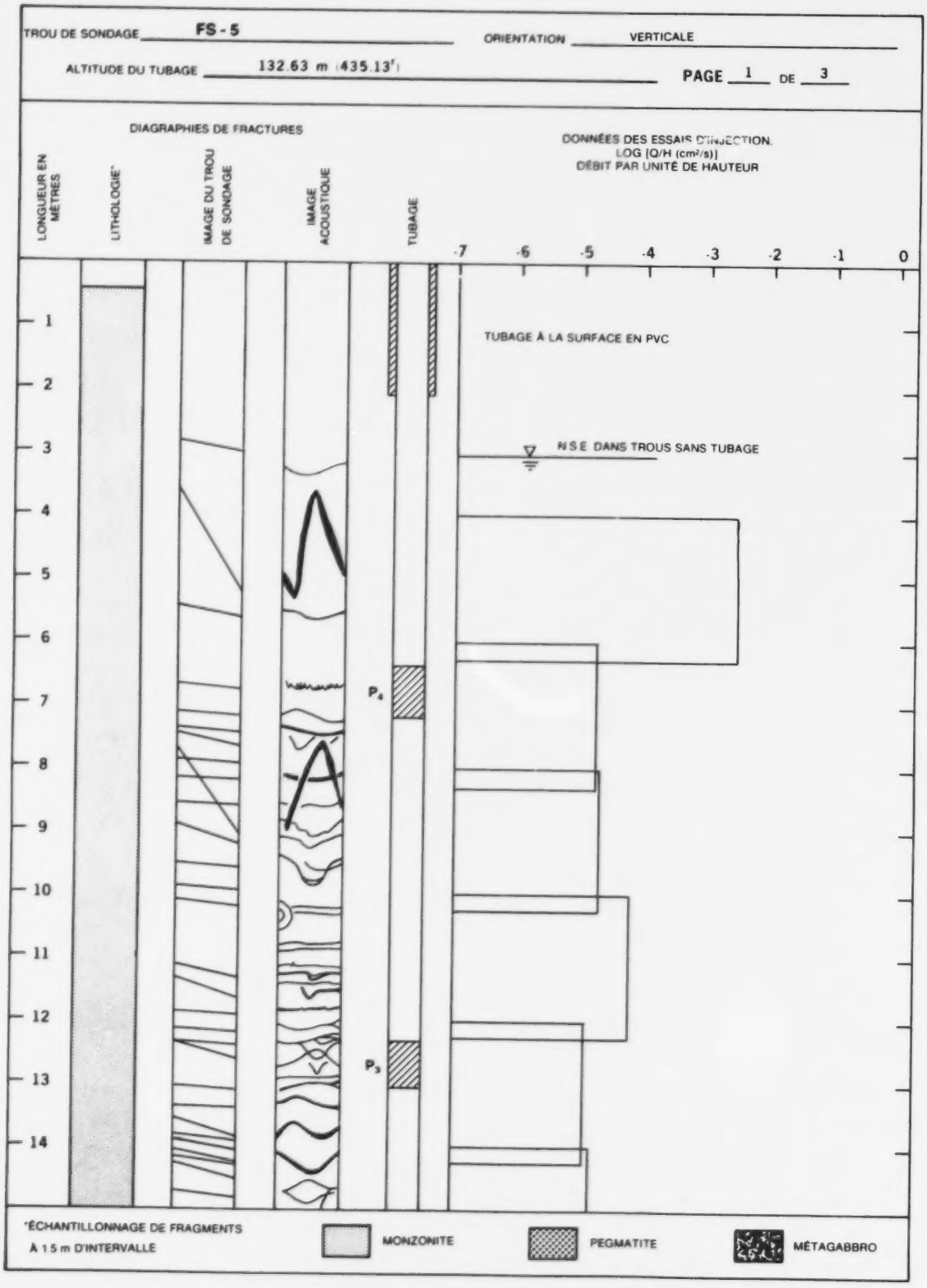

TROU DE SONDAGE FS - 3
PAGE 2 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION
LOG [Q/H (cm² s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
·7
·6
·5
·4
·3
·2
·1
0
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
P3
P2
P1

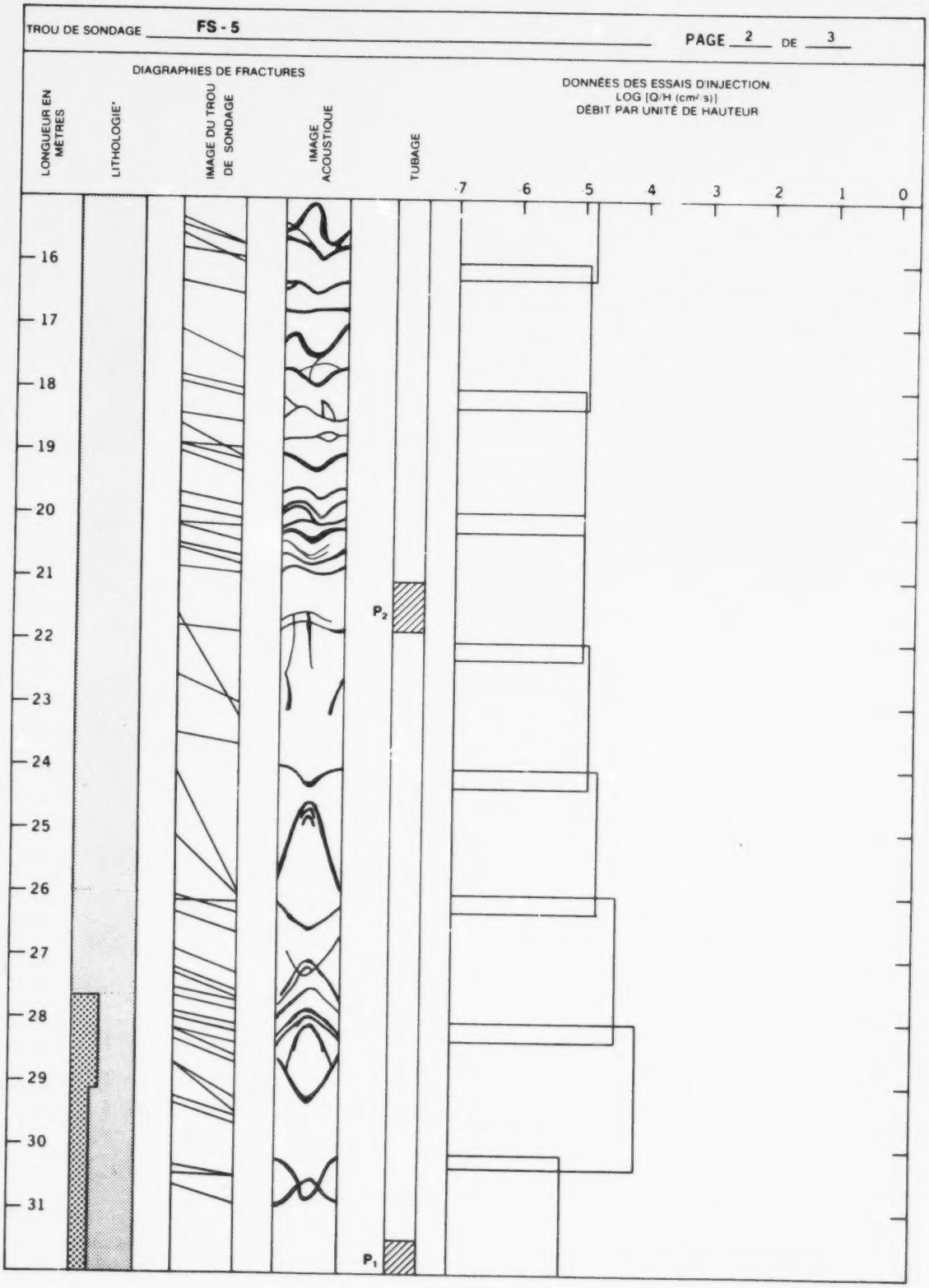

TROU DE SONDAGE FS - 3
PAGE 3 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION:
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
P1
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
FOND DU TROU = 41.50 m SST

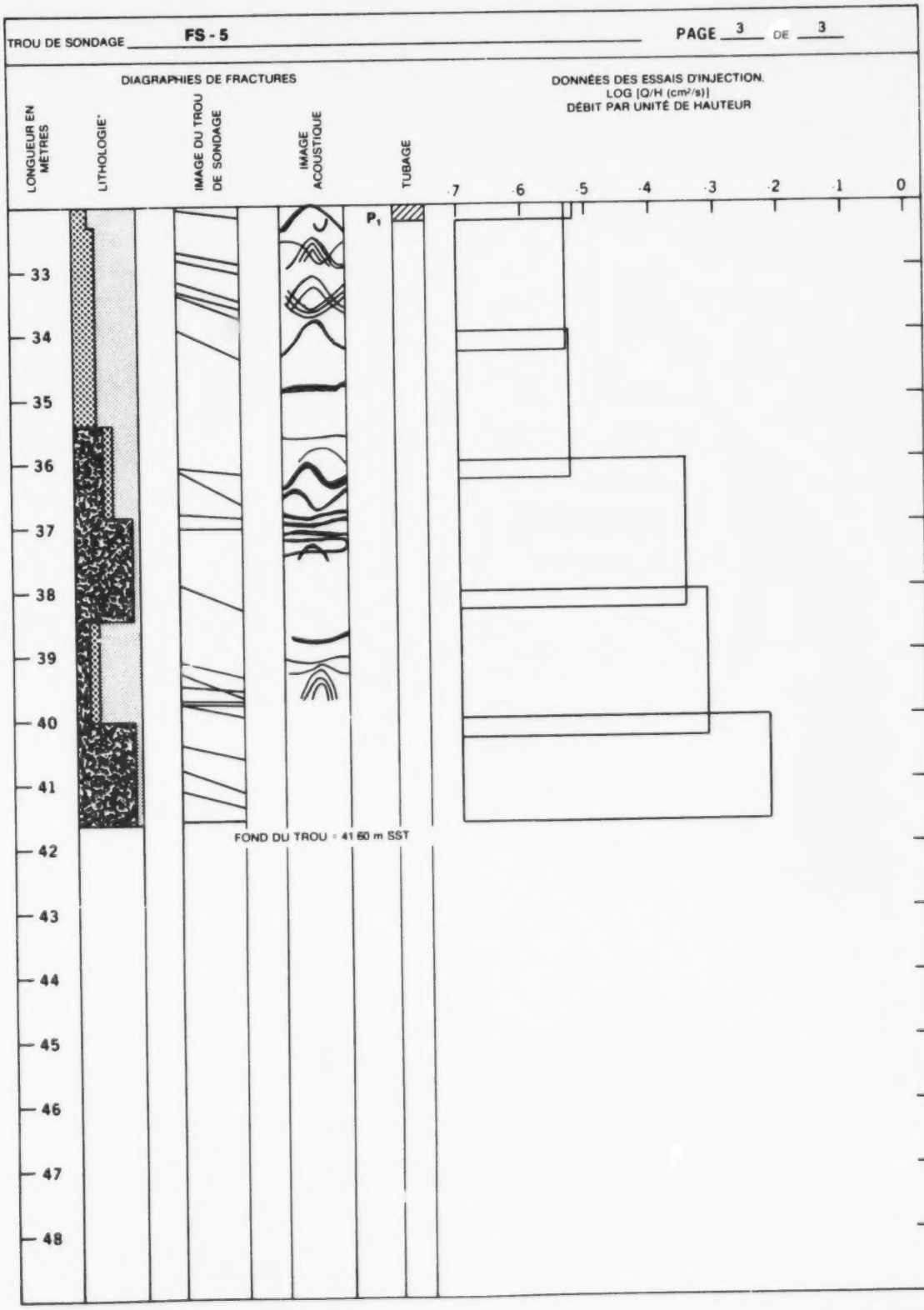

TROU DE SONDAGE FS - 4
ORIENTATION VERTICALE
ALTITUDE DU TUBAGE 132.48 m (434.66')
PAGE 1 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
·7 ·6 ·5 ·4 ·3 ·2 ·1 0
MORT-TERRAIN
TUBAGE À LA SURFACE EN PVC
N.S.E. DANS TROUS SANS TUBAGE
P5
P4
P3
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
*ÉCHANTILLONNAGE DE FRAGMENTS À 1.5 m D'INTERVALLE
MONZONITE
PEGMATITE
MÉTAGABBRO


TROU DE SONDAGE FS - 4
PAGE 2 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION.
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
·7
·6
·5
·4
·3
·2
·1
0
P3
P2
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31


TROU DE SONDAGE FS - 4
PAGE 3 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION.
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
·7 ·6 ·5 ·4 ·3 ·2 ·1 0
33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48
P1
NON ENREGISTRÉ
NON ENREGISTRÉ
FOND DU TROU = 42 50 m SST

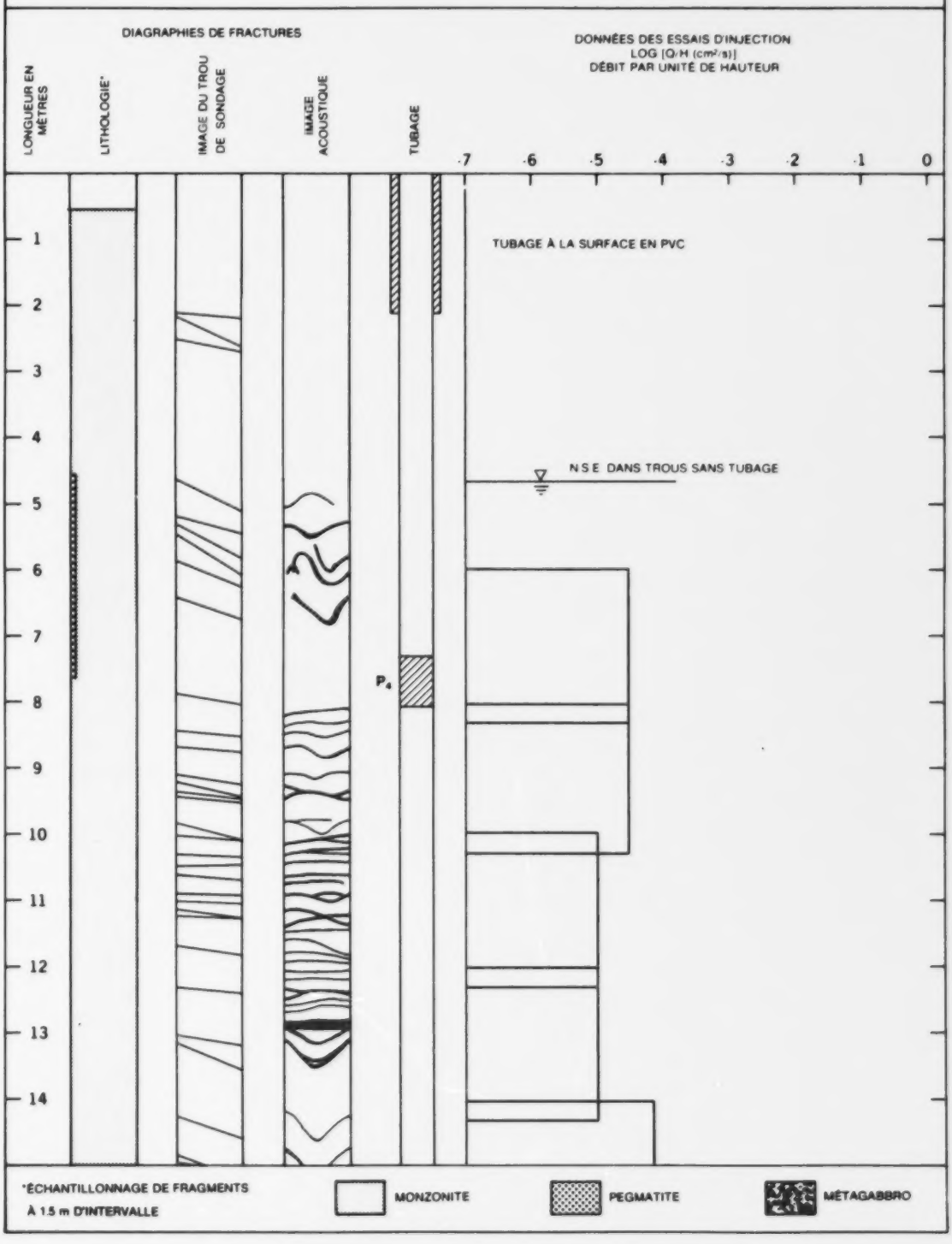

TROU DE SONDAGE FS - 5
ORIENTATION VERTICALE
ALTITUDE DU TUBAGE 132.63 m (435.13')
PAGE 1 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION.
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
TUBAGE À LA SURFACE EN PVC
NSE DANS TROUS SANS TUBAGE
P4
P3
*ÉCHANTILLONNAGE DE FRAGMENTS
À 1.5 m D'INTERVALLE
MONZONITE
PEGMATITE
MÉTAGABBRO

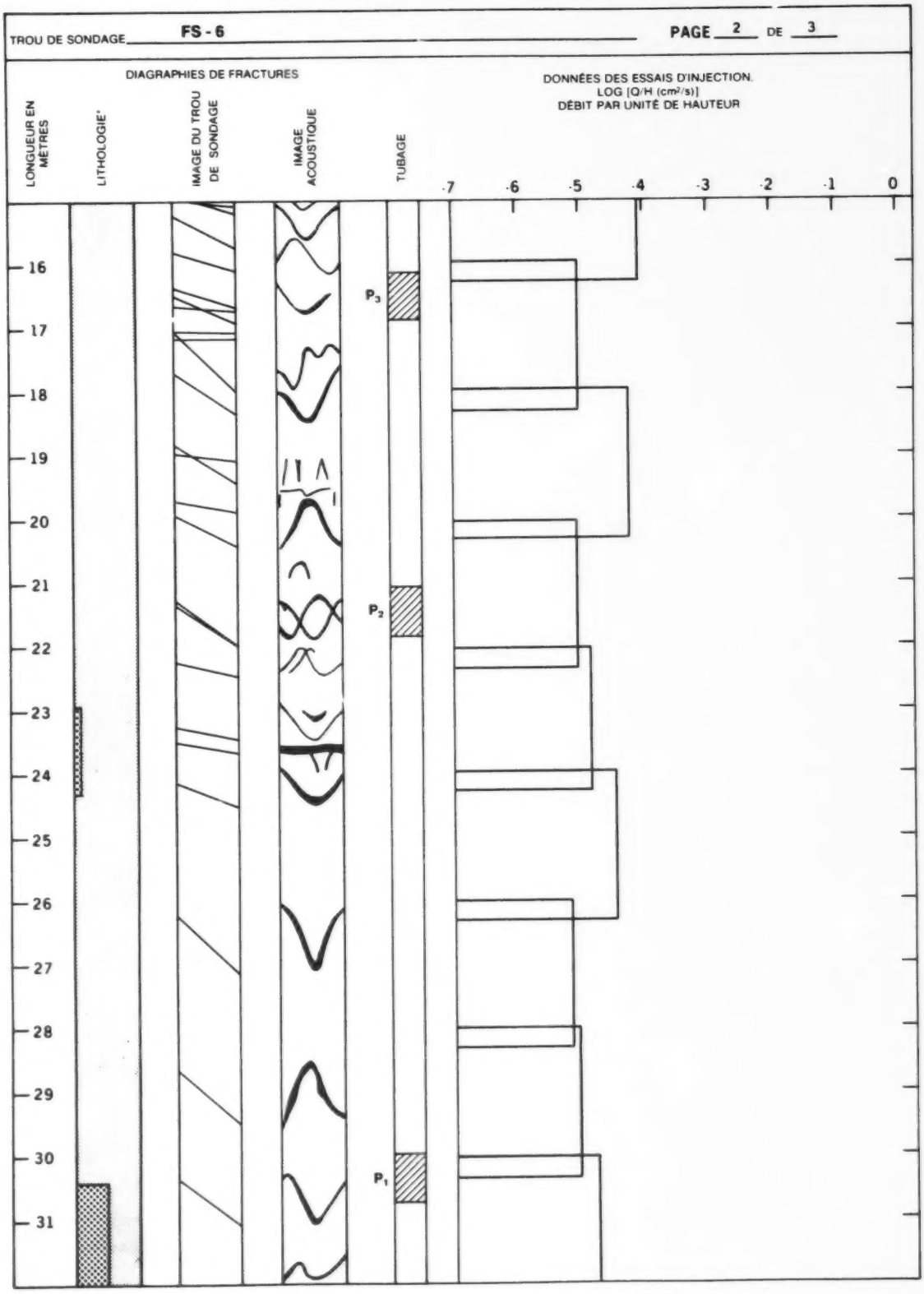

TROU DE SONDAGE FS - 5
PAGE 2 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
7
6
5
4
3
2
1
0
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
P2
P1

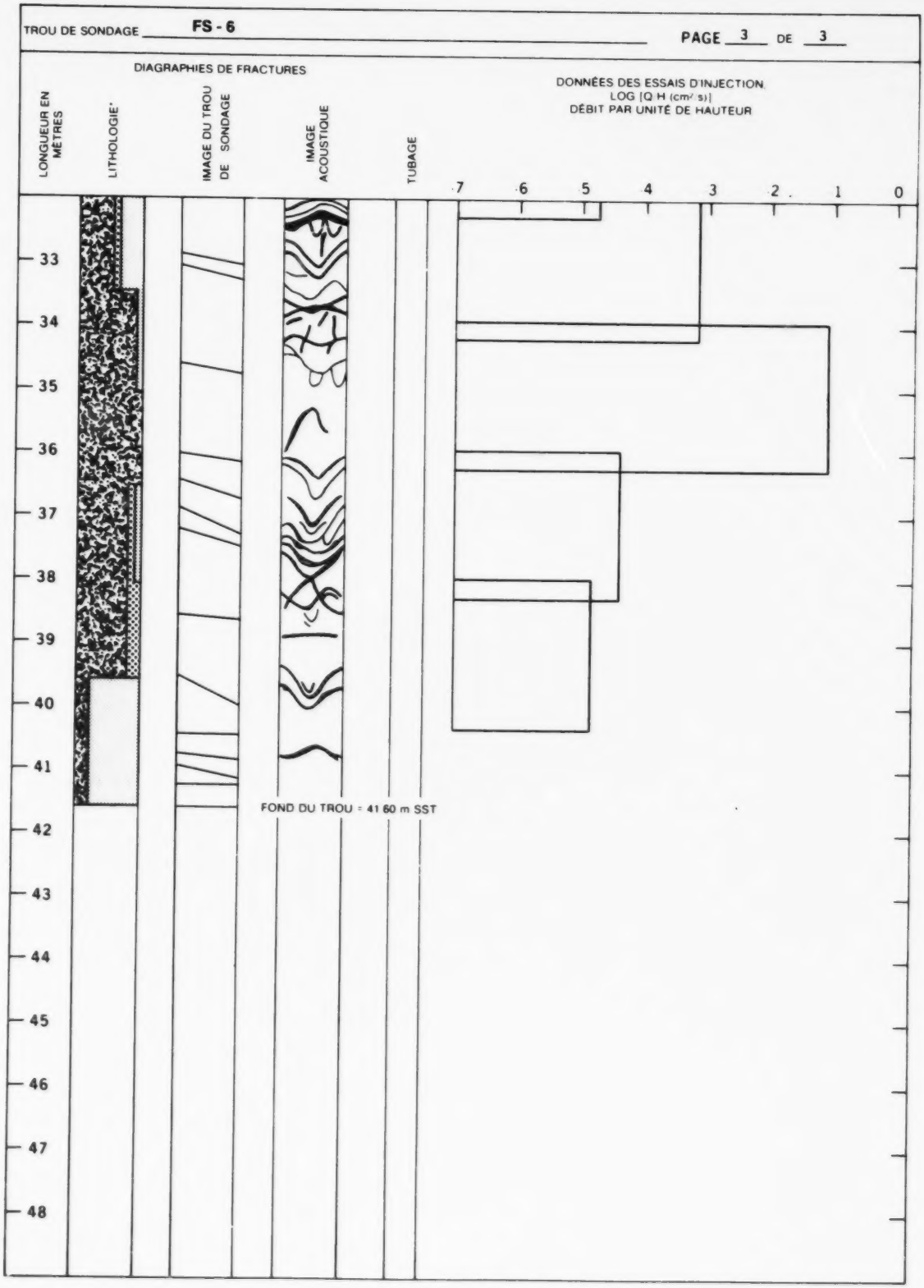

TROU DE SONDAGE FS - 5
PAGE 3 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION.
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
P1
7
6
5
4
3
2
1
0
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
FOND DU TROU = 41.60 m SST

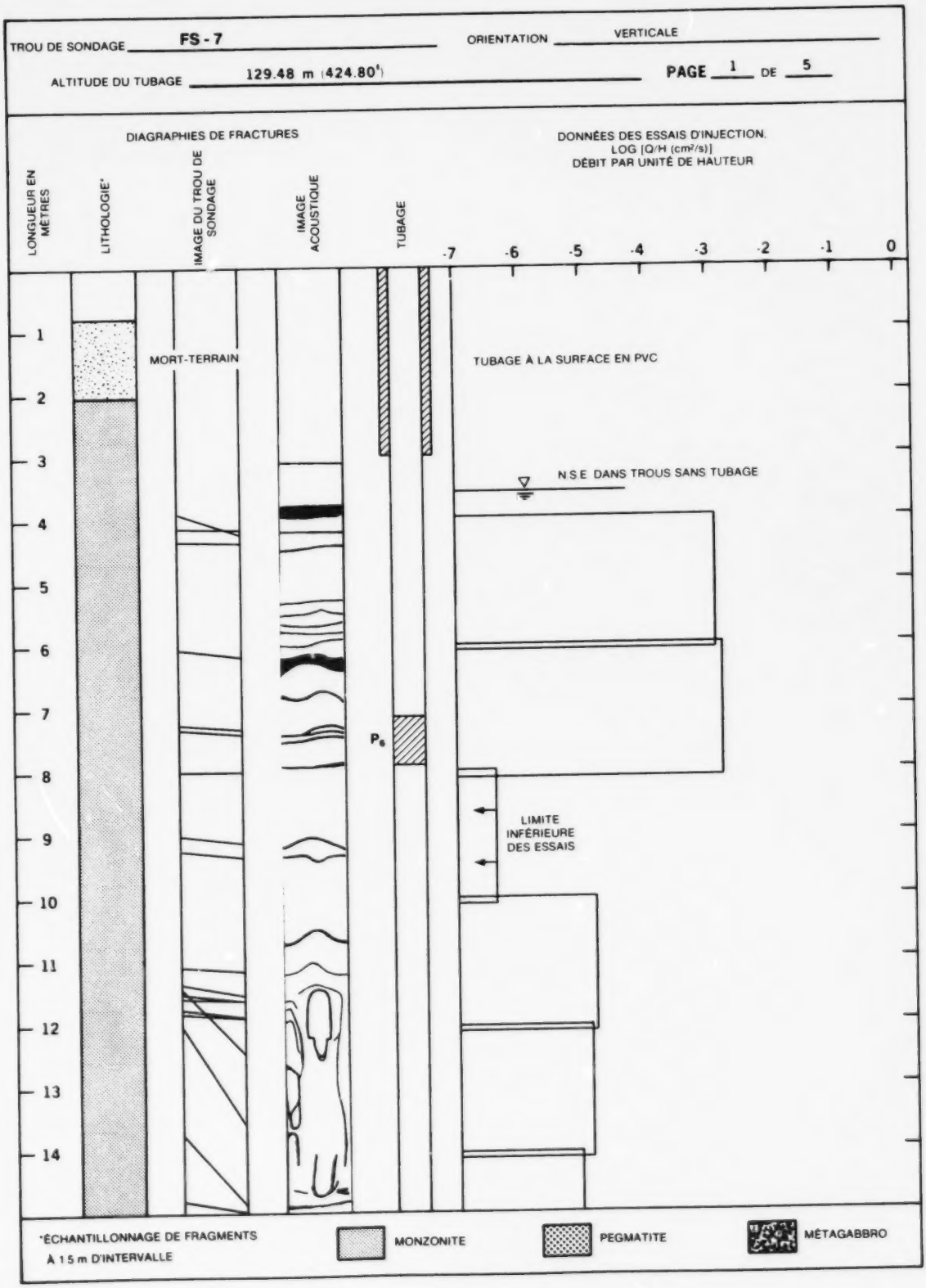
TROU DE SONDAGE FS - 6 ORIENTATION VERTICALE

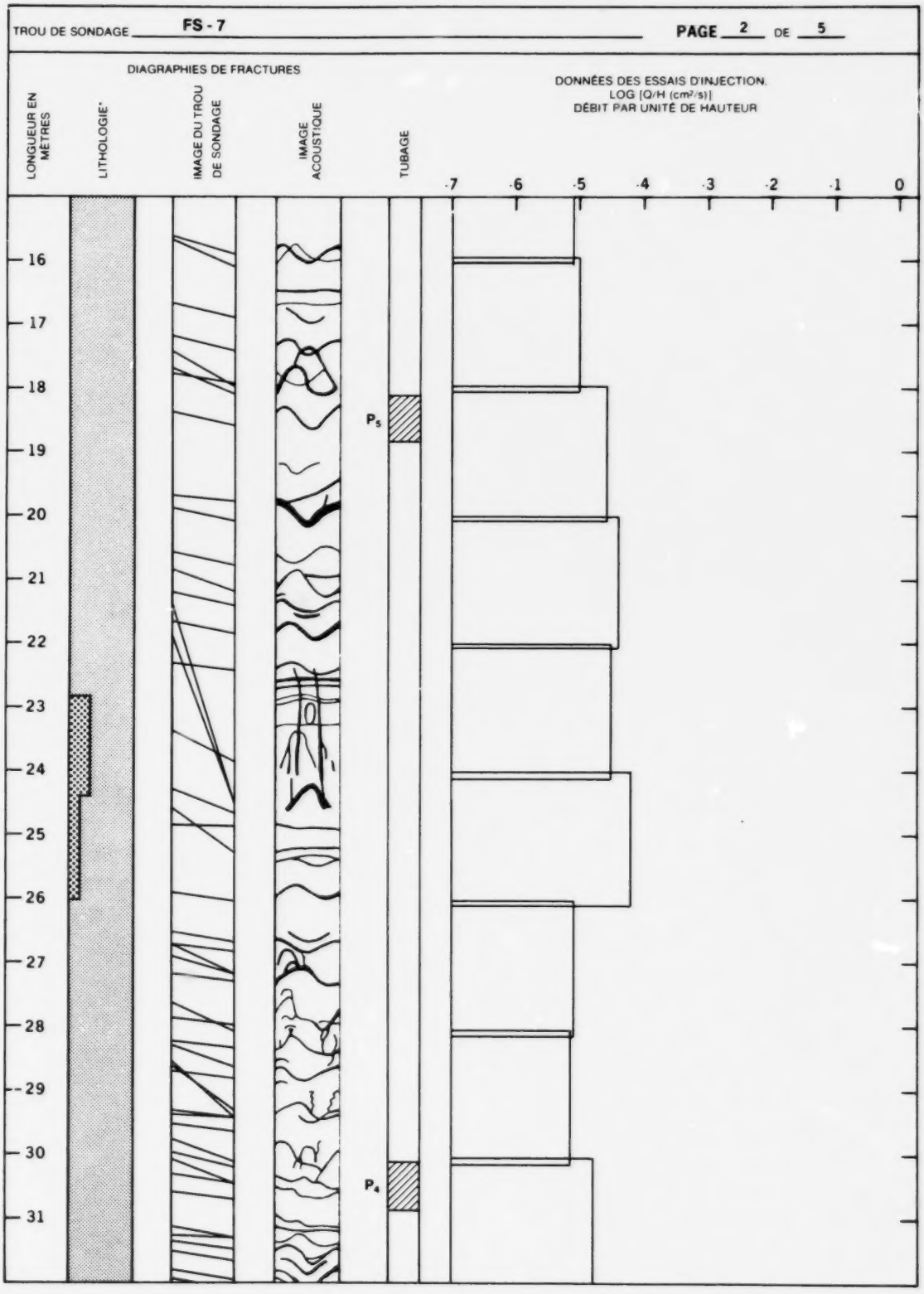
ALTITUDE DU TUBAGE 134.53 m (441.42') PAGE 1 DE 3

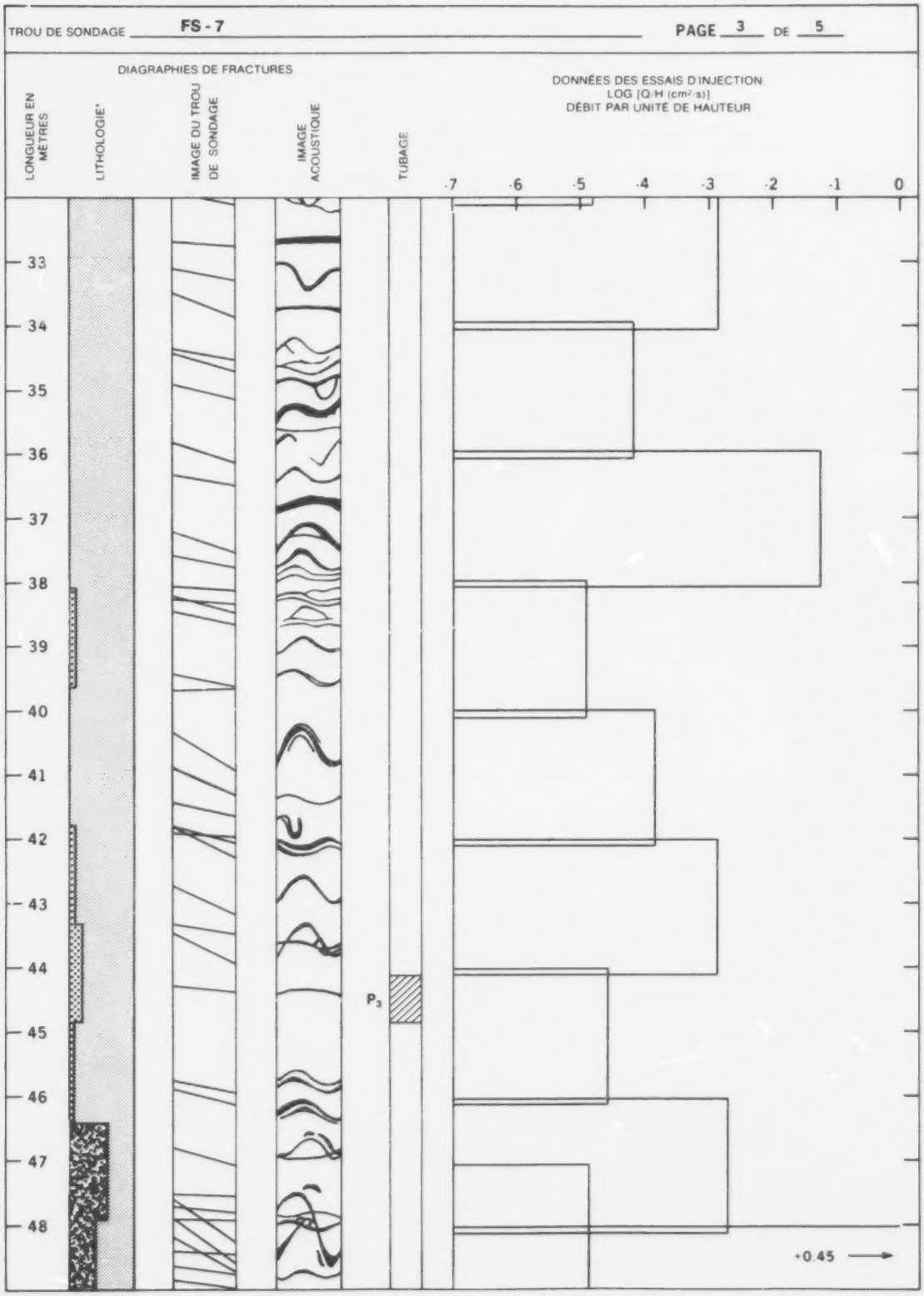


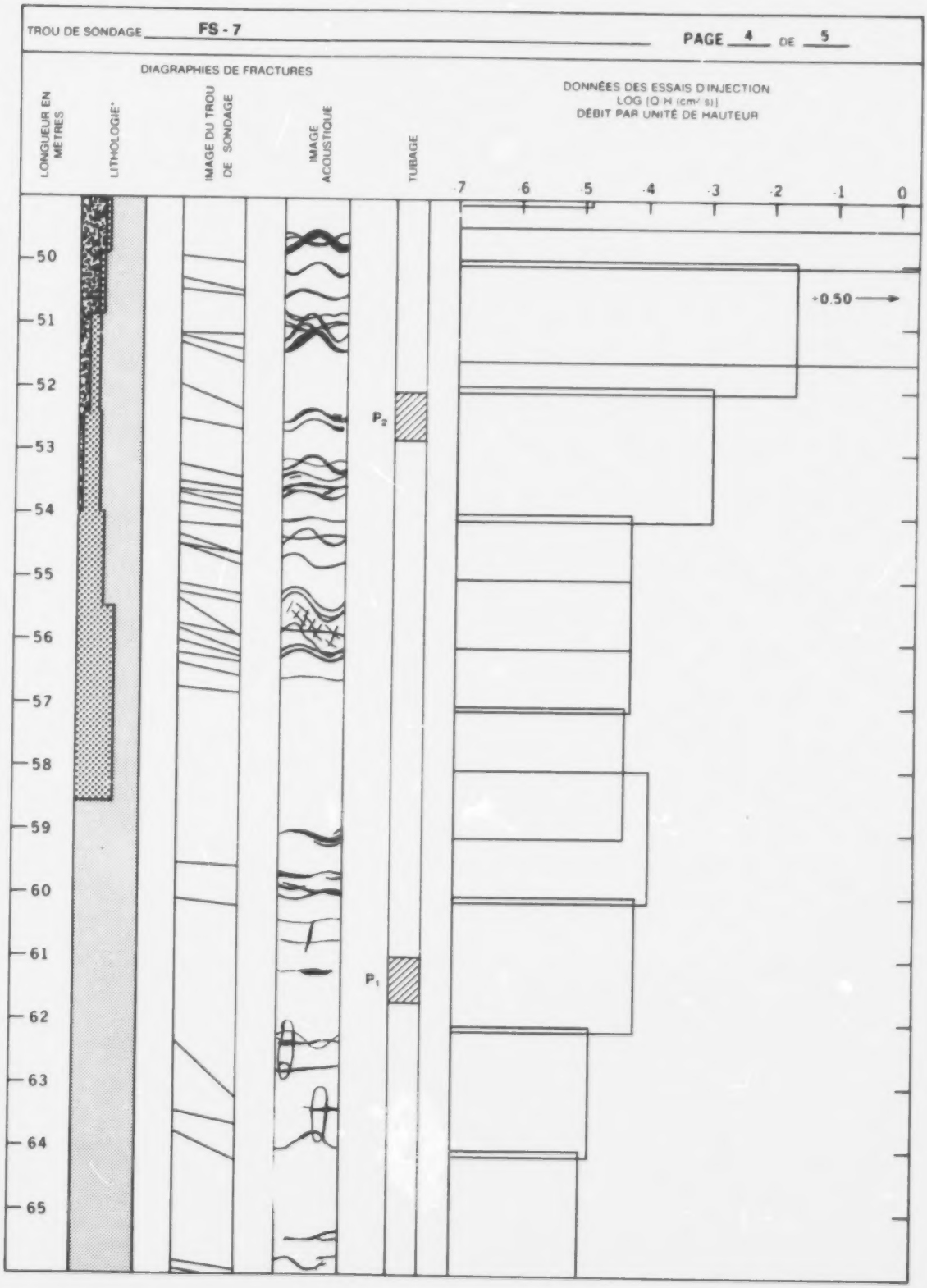

TROU DE SONDAGE FS - 6
PAGE 2 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION.
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
P3
P2
P1


TROU DE SONDAGE FS - 6
PAGE 3 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION
LOG [Q.H (cm²/ s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
7
6
5
4
3
2
1
0
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
FOND DU TROU = 41 60 m SST

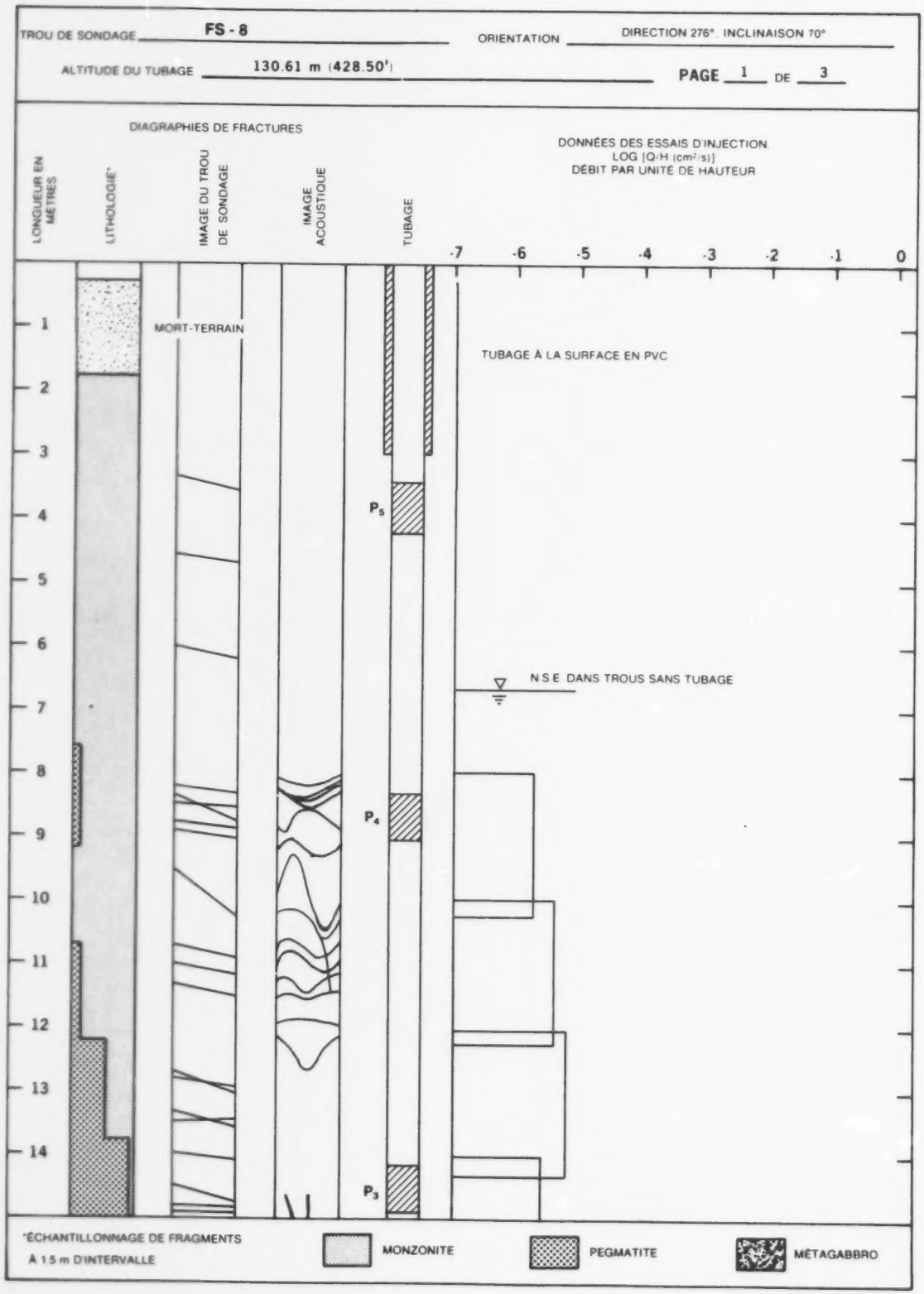

TROU DE SONDAGE FS - 7
ORIENTATION VERTICALE
ALTITUDE DU TUBAGE 129.48 m (424.80')
PAGE 1 DE 5
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION.
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
MORT-TERRAIN
TUBAGE À LA SURFACE EN PVC
N.S.E. DANS TROUS SANS TUBAGE
P_6
LIMITE INFÉRIEURE DES ESSAIS
*ÉCHANTILLONNAGE DE FRAGMENTS À 1.5 m D'INTERVALLE
MONZONITE
PEGMATITE
MÉTAGABBRO

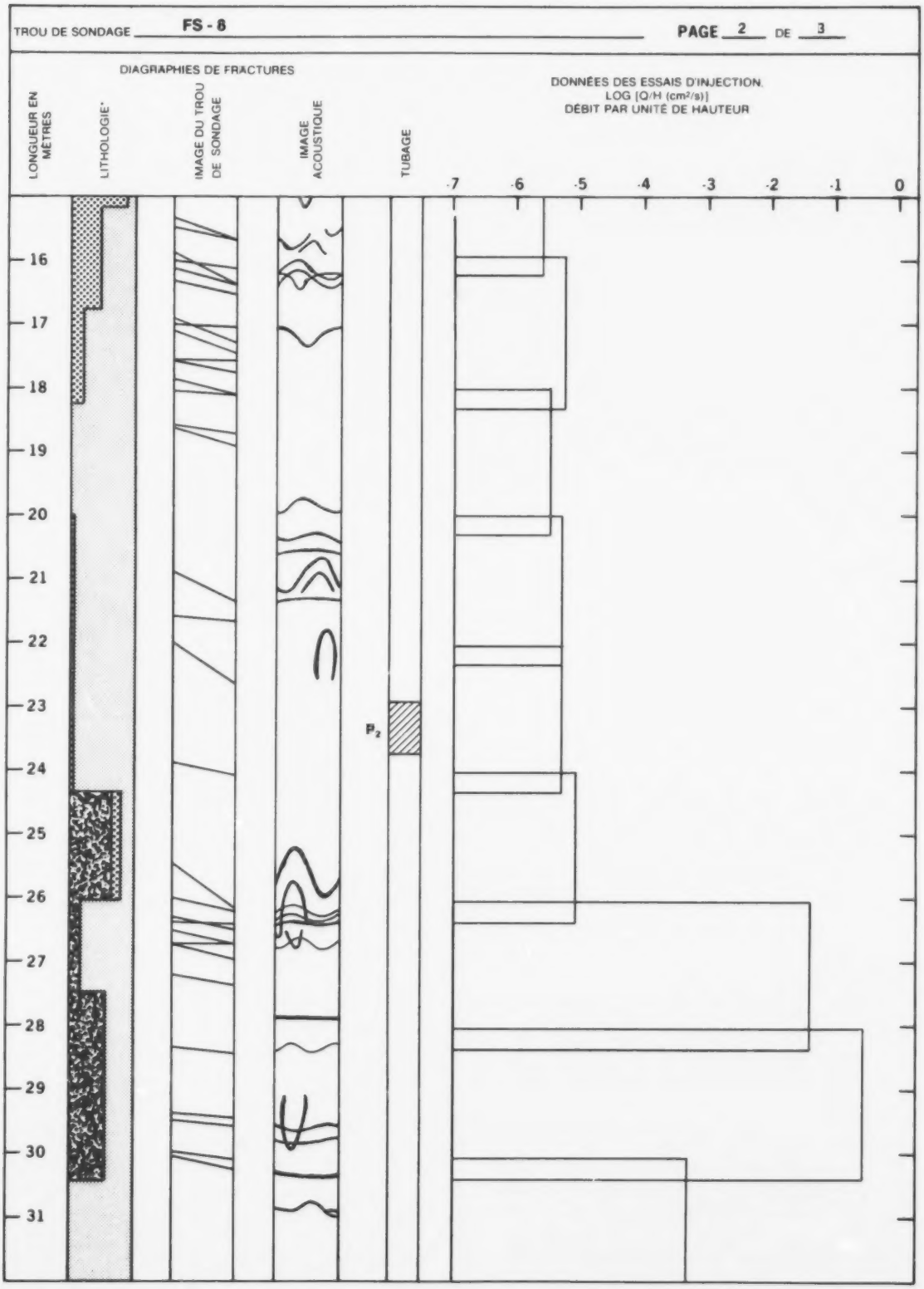

TROU DE SONDAGE FS - 7
PAGE 2 DE 5
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION.
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
P5
P4

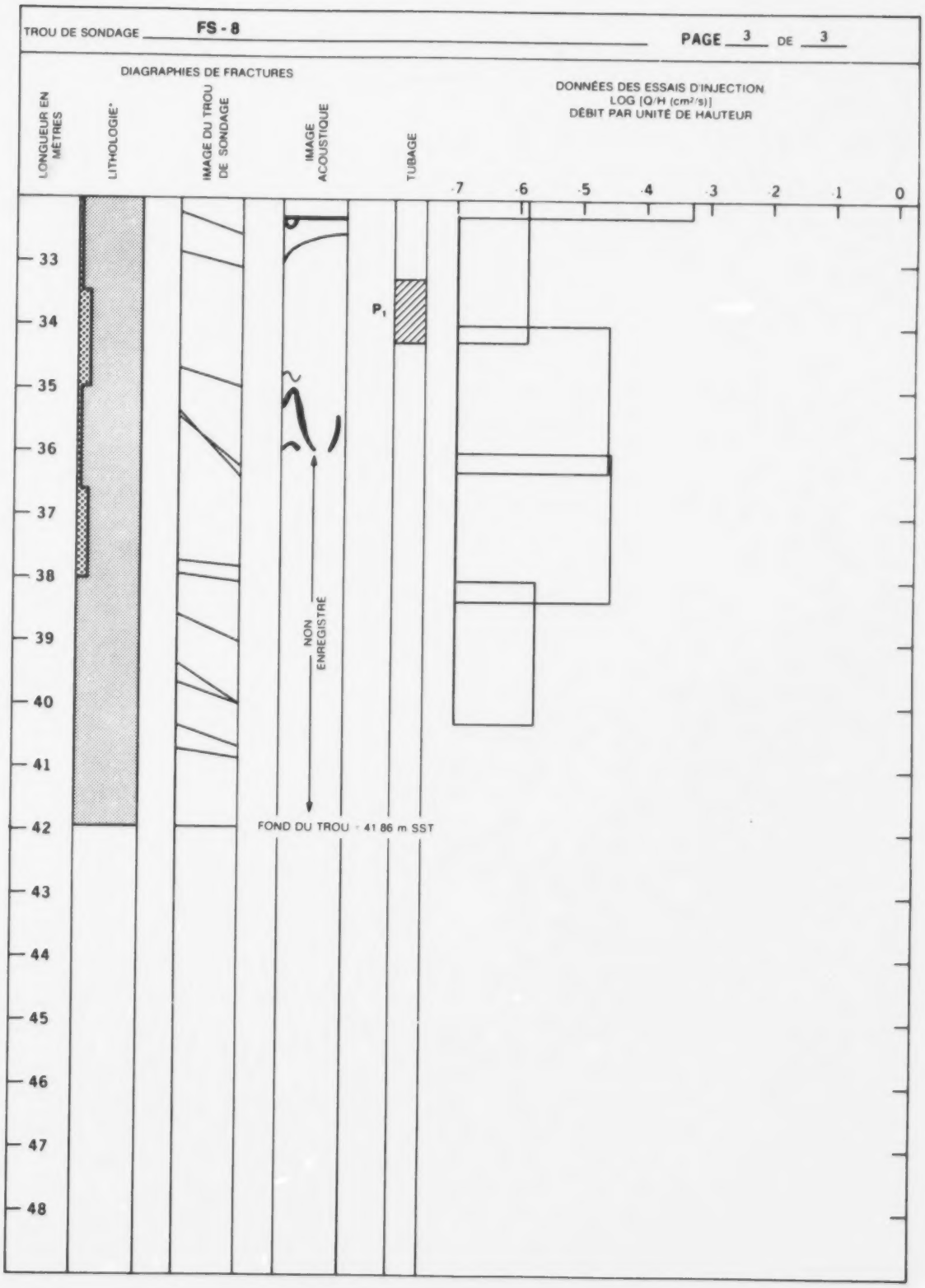

TROU DE SONDAGE FS - 7
PAGE 3 DE 5
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
P3
+0.45


TROU DE SONDAGE FS - 7
PAGE 4 DE 5
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION
LOG (Q H (cm² s))
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
-7 -6 -5 -4 -3 -2 -1 0
-0.50
50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65
P2
P1

TROU DE SONDAGE FS-7
PAGE 5 DE 5
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
LIMITE INFÉRIEURE DES ESSAIS
FOND DU TROU : 74.15 m SST

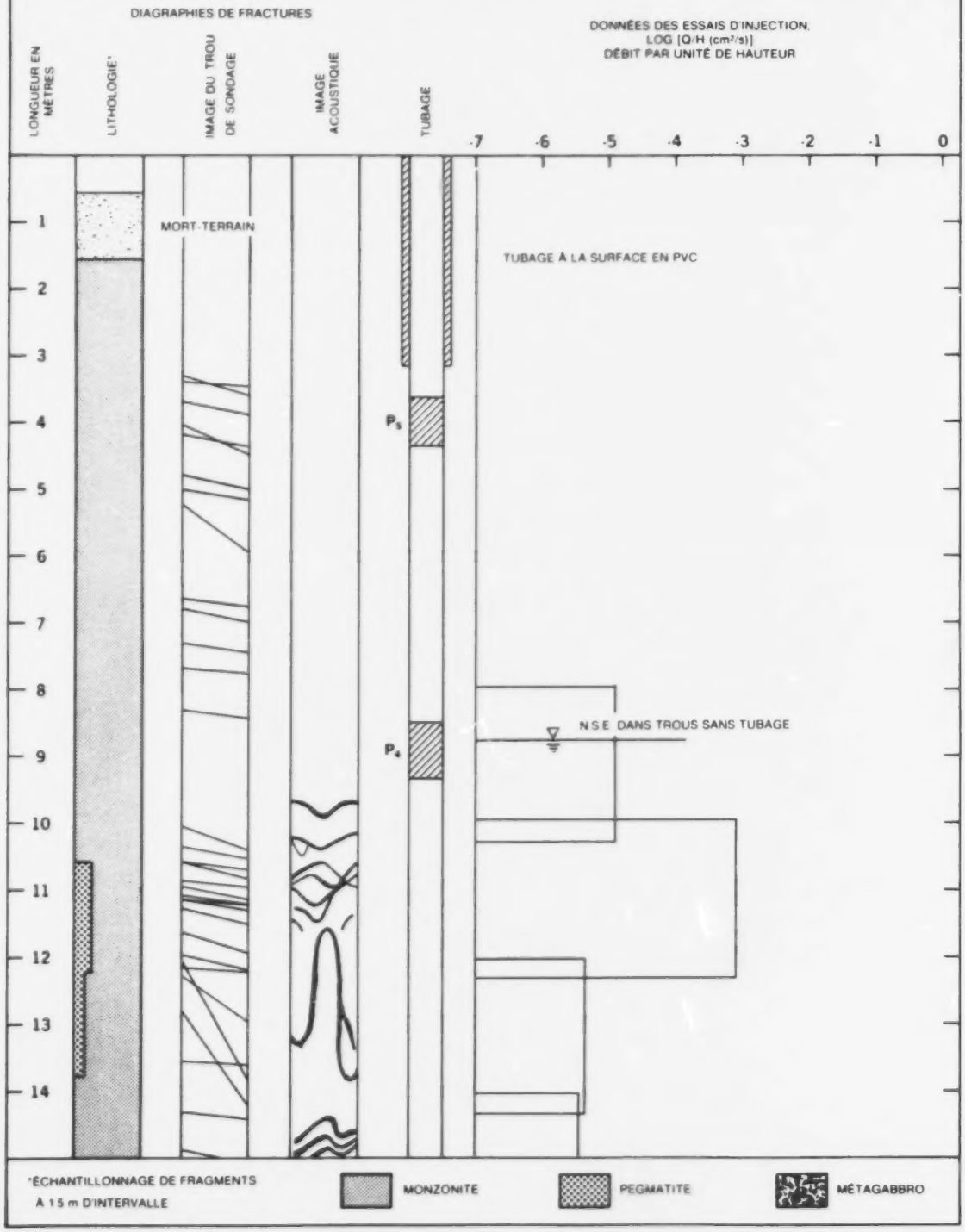

TROU DE SONDAGE FS - 8
ORIENTATION DIRECTION 276° INCLINAISON 70°
ALTITUDE DU TUBAGE 130.61 m (428.50')
PAGE 1 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
-7 -6 -5 -4 -3 -2 -1 0
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
MORT-TERRAIN
TUBAGE À LA SURFACE EN PVC
P5
N.S.E. DANS TROUS SANS TUBAGE
P4
P3
*ÉCHANTILLONNAGE DE FRAGMENTS À 1.5 m D'INTERVALLE
MONZONITE
PEGMATITE
MÉTAGABBRO

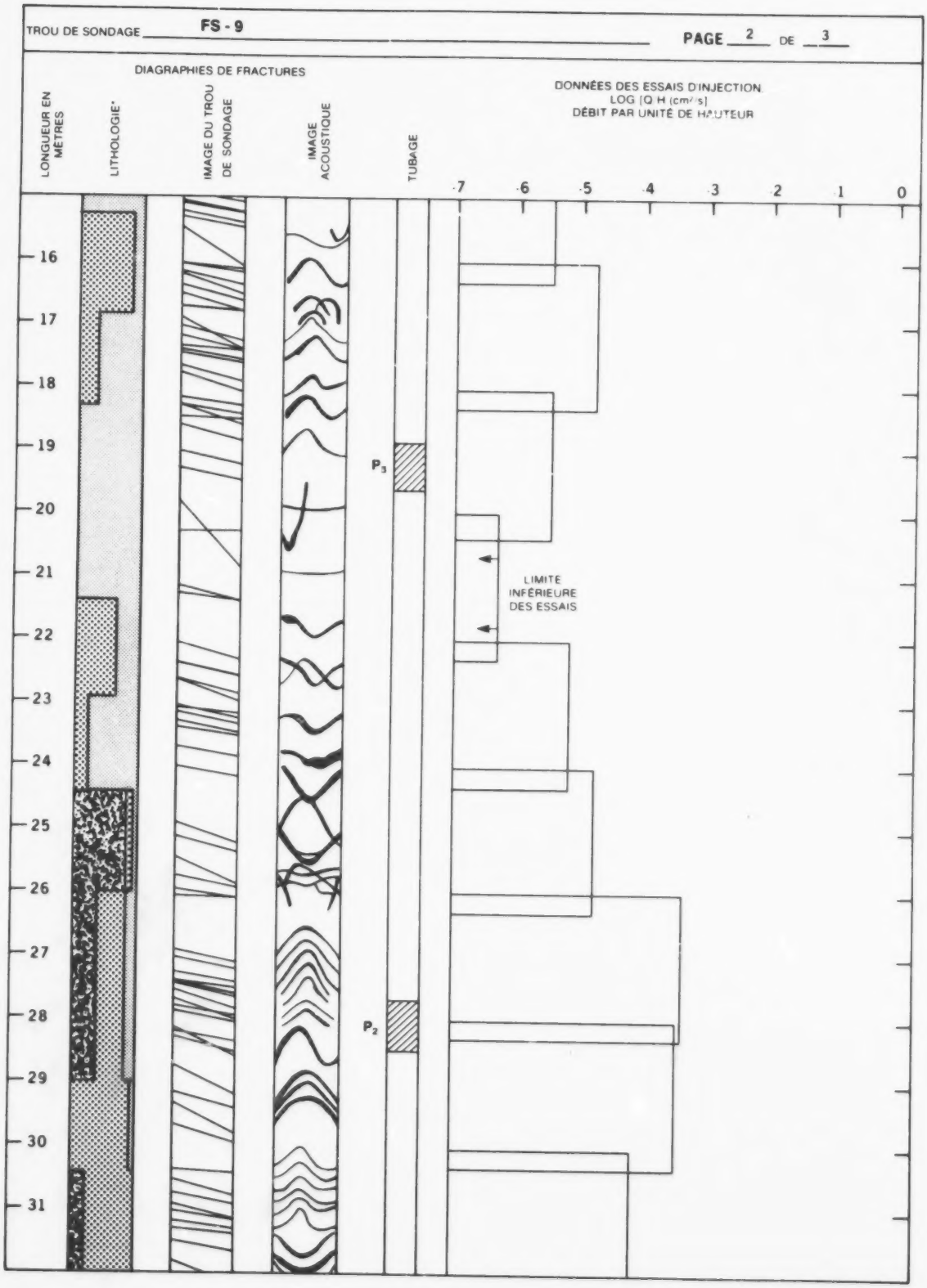

TROU DE SONDAGE FS - 8
PAGE 2 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN METRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION.
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
P2

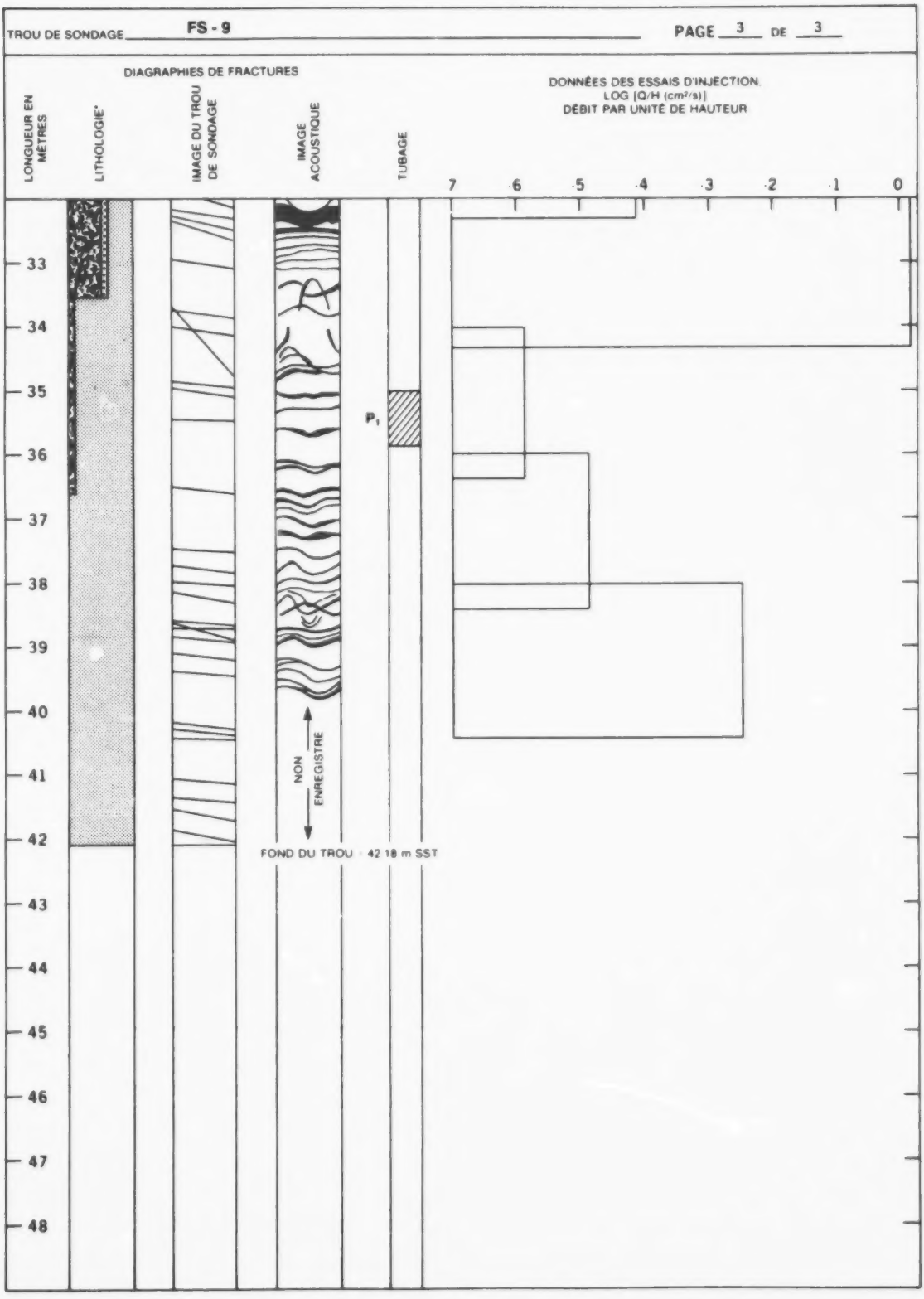

TROU DE SONDAGE FS - 8
PAGE 3 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
P1
NON ENREGISTRÉ
FOND DU TROU - 41.86 m SST

TROU DE SONDAGE FS - 9 ORIENTATION DIRECTION 236°, INCLINAISON 70°

ALTITUDE DU TUBAGE 132.74 m (435.49') PAGE 1 DE 3

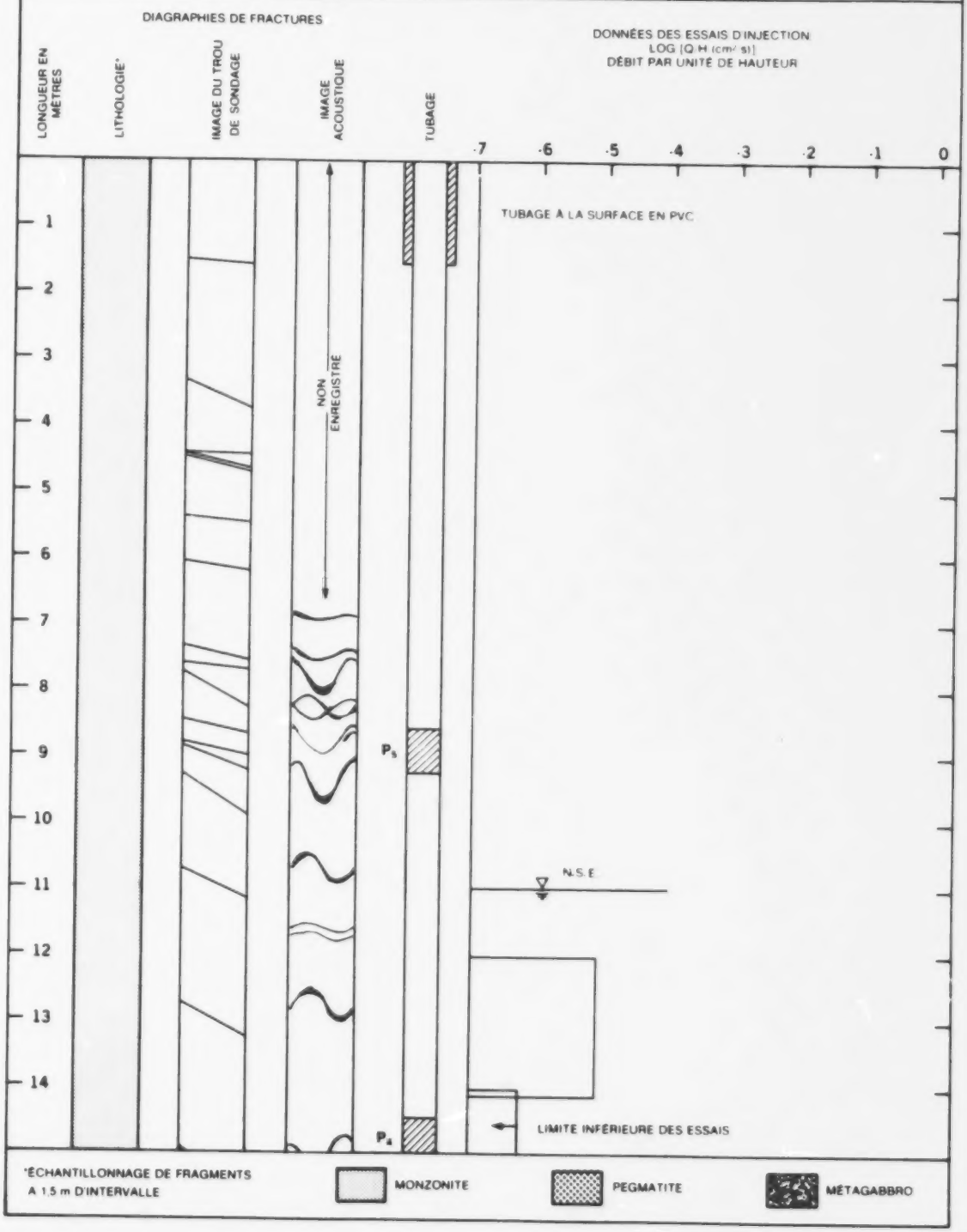


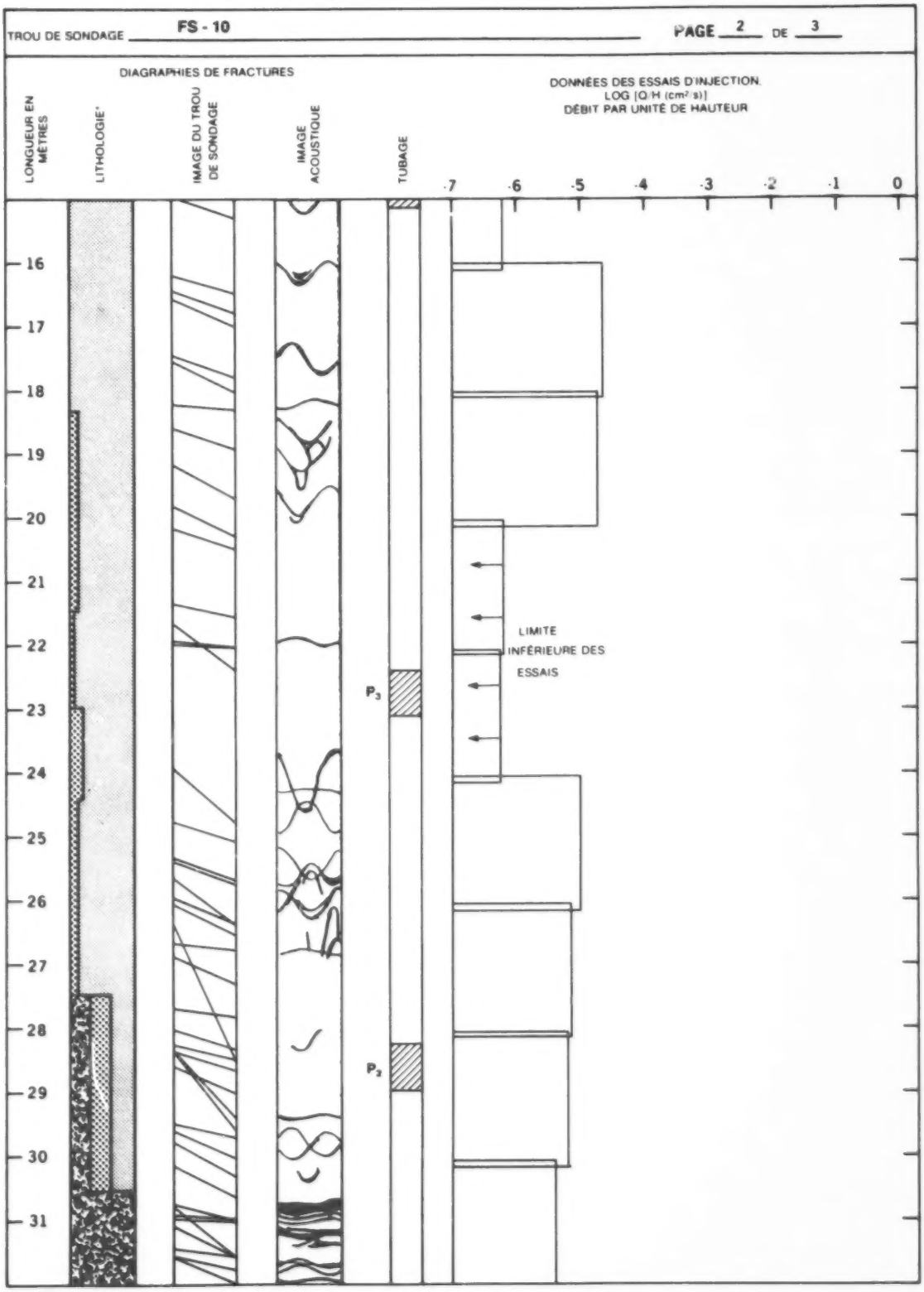

TROU DE SONDAGE FS - 9
PAGE 2 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION
LOG [Q H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
P3
P2
LIMITE INFÉRIEURE DES ESSAIS

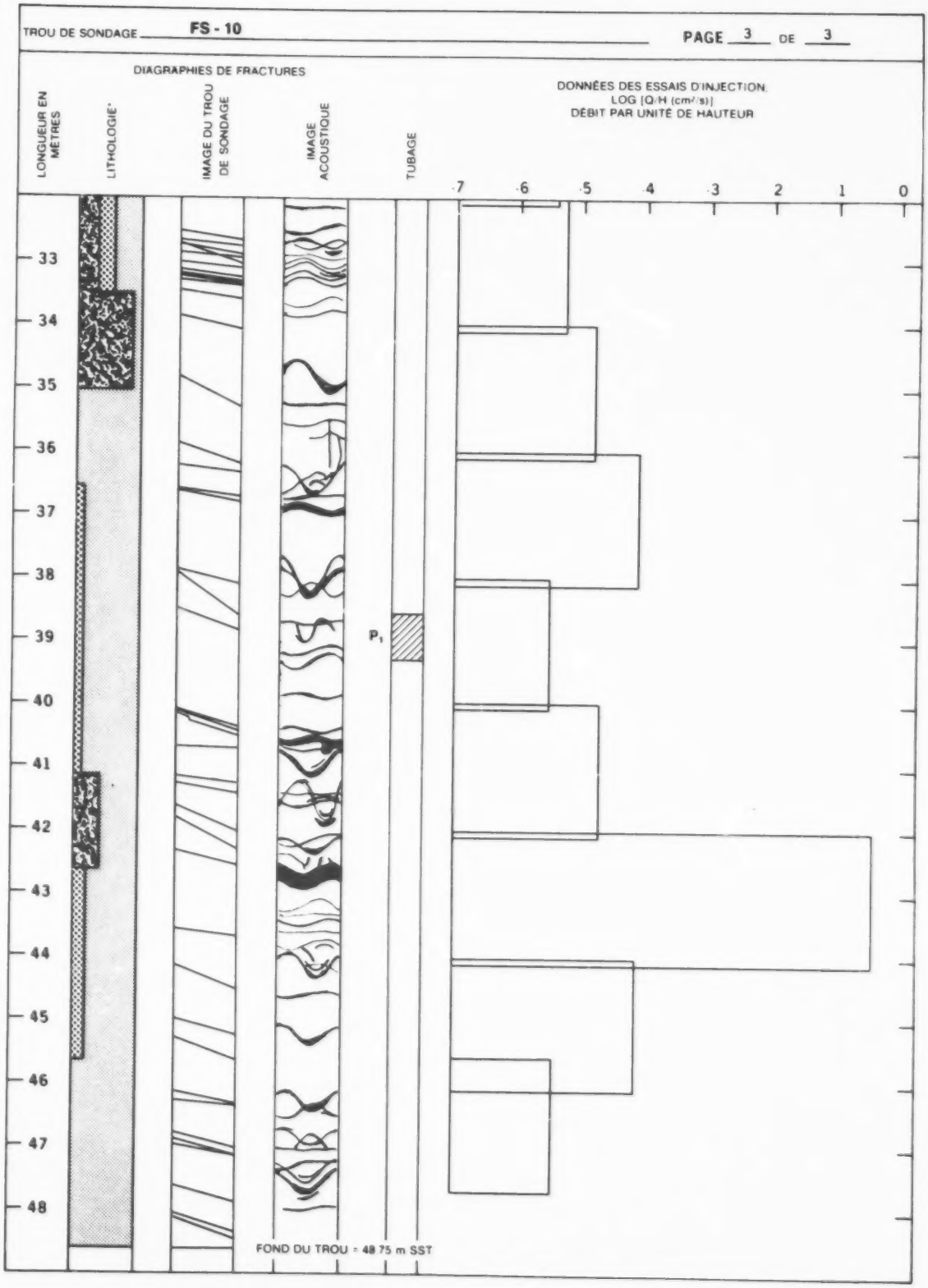

TROU DE SONDAGE FS - 9
PAGE 3 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
7 6 5 4 3 2 1 0
33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48
P1
NON ENREGISTRÉ
FOND DU TROU : 42.18 m SST

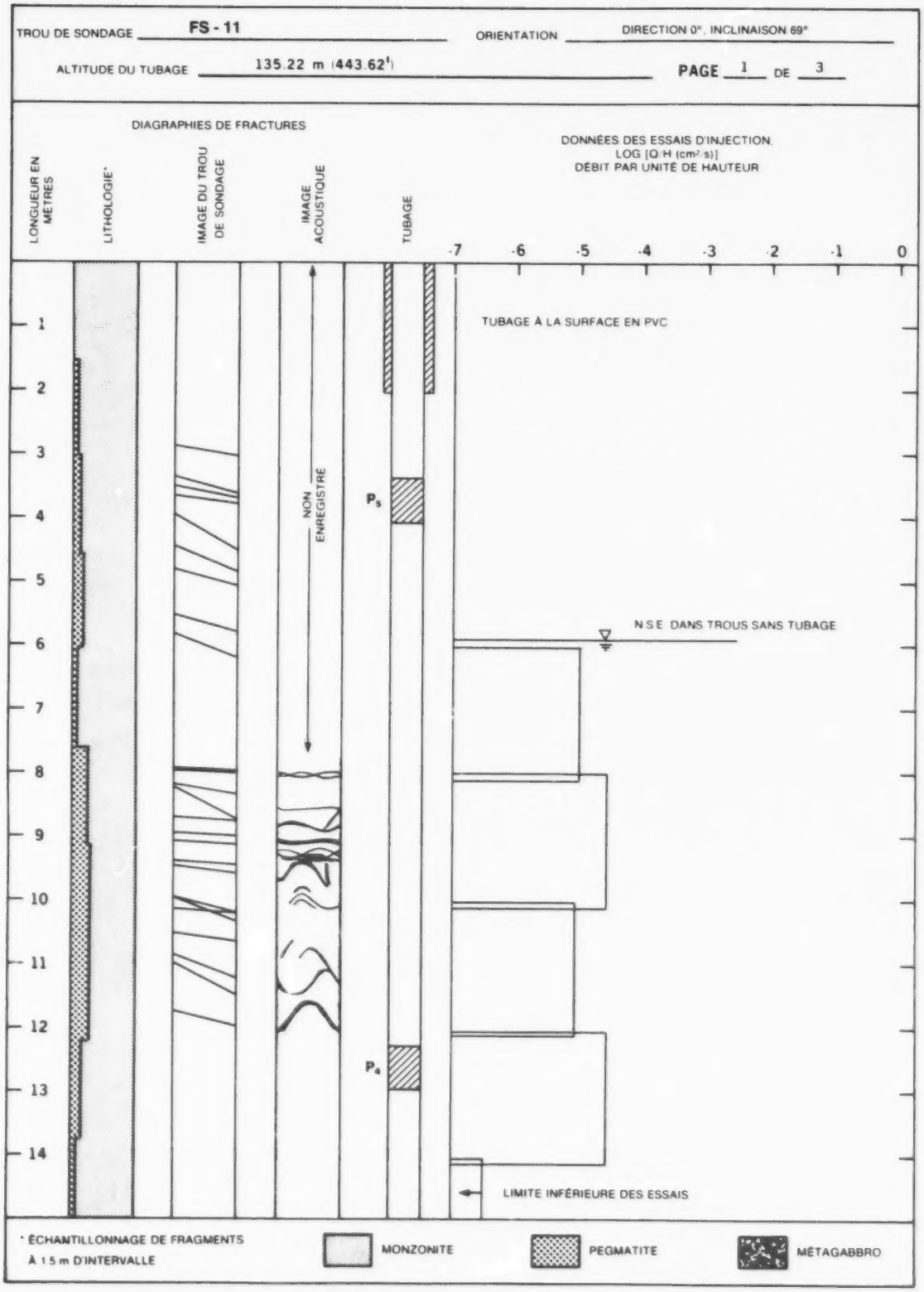
TROU DE SONDAGE FS - 10 ORIENTATION VERTICALE

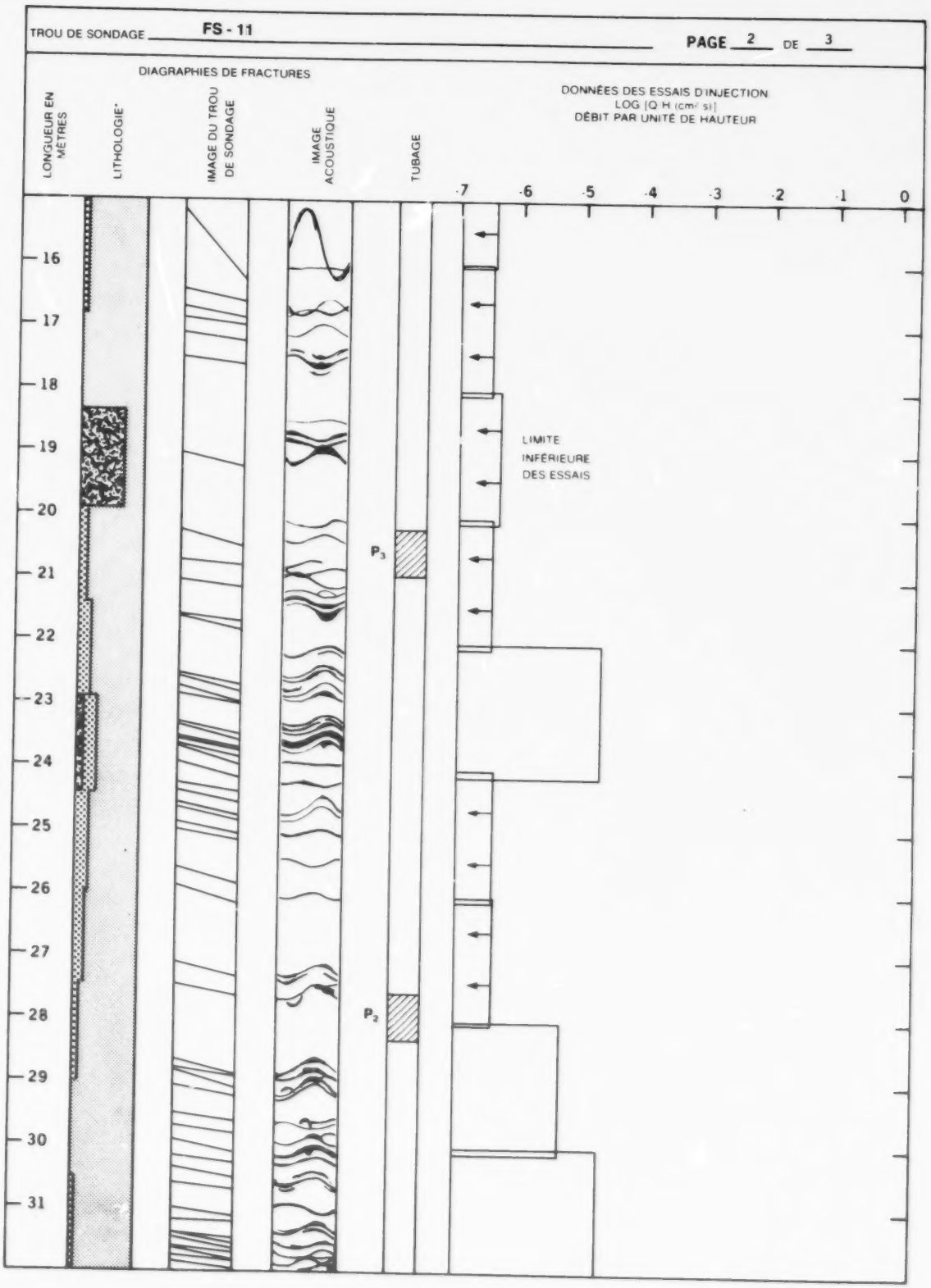
ALTITUDE DU TUBAGE 137.34 m (450.61') PAGE 1 DE 3

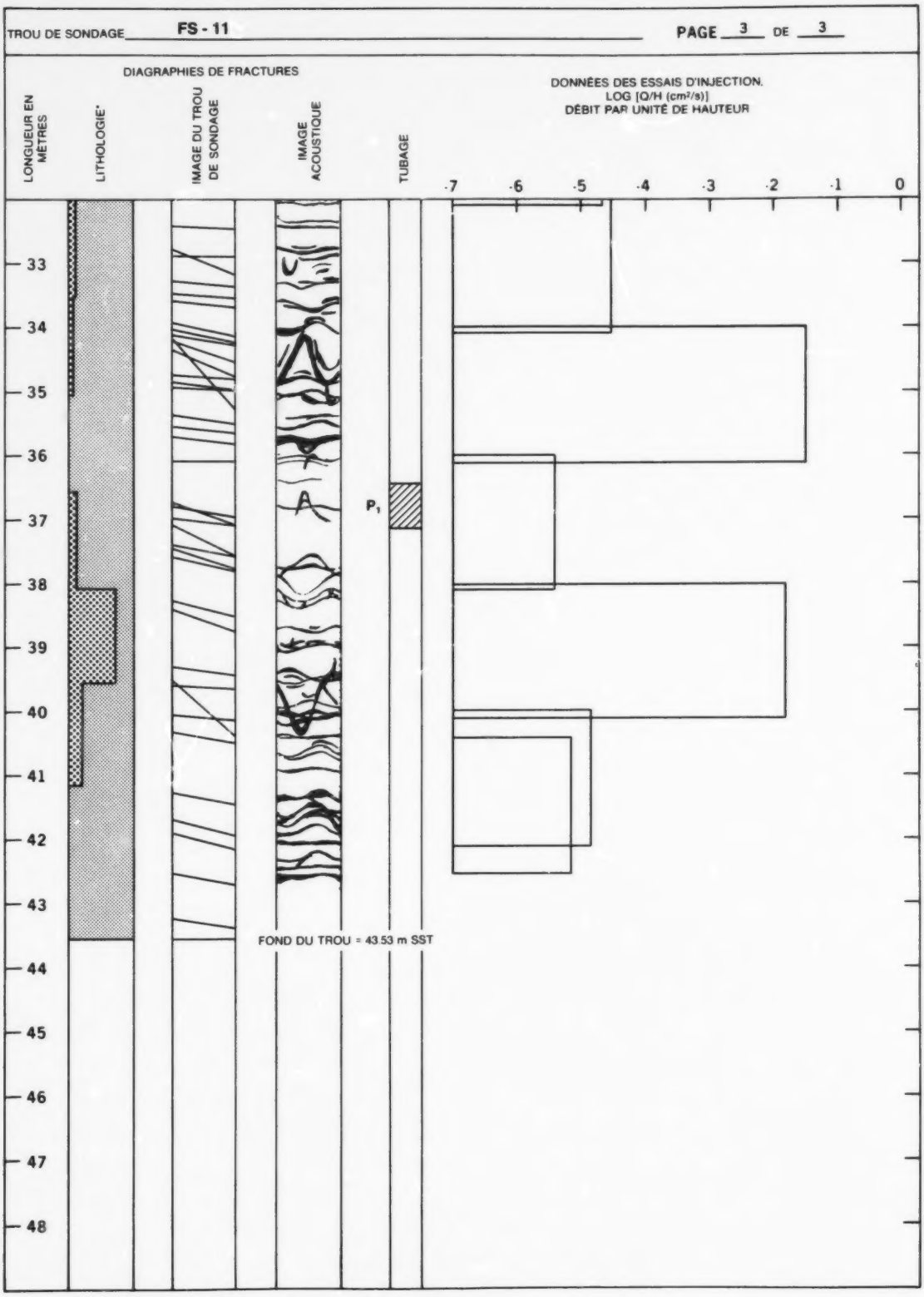


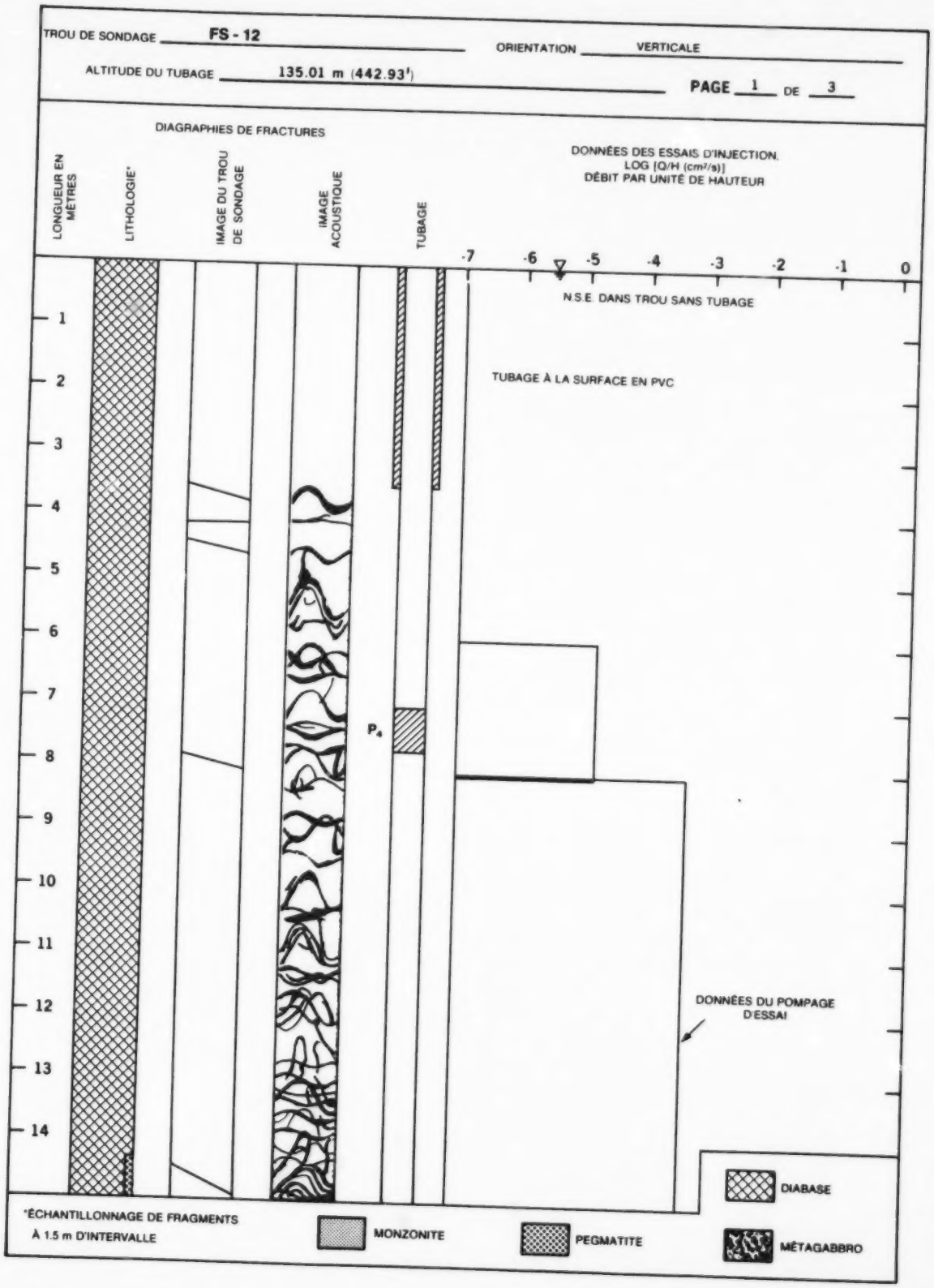

TROU DE SONDAGE FS - 10
PAGE 2 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION.
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
·7 ·6 ·5 ·4 ·3 ·2 ·1 0
16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
P3
P2
LIMITE INFÉRIEURE DES ESSAIS

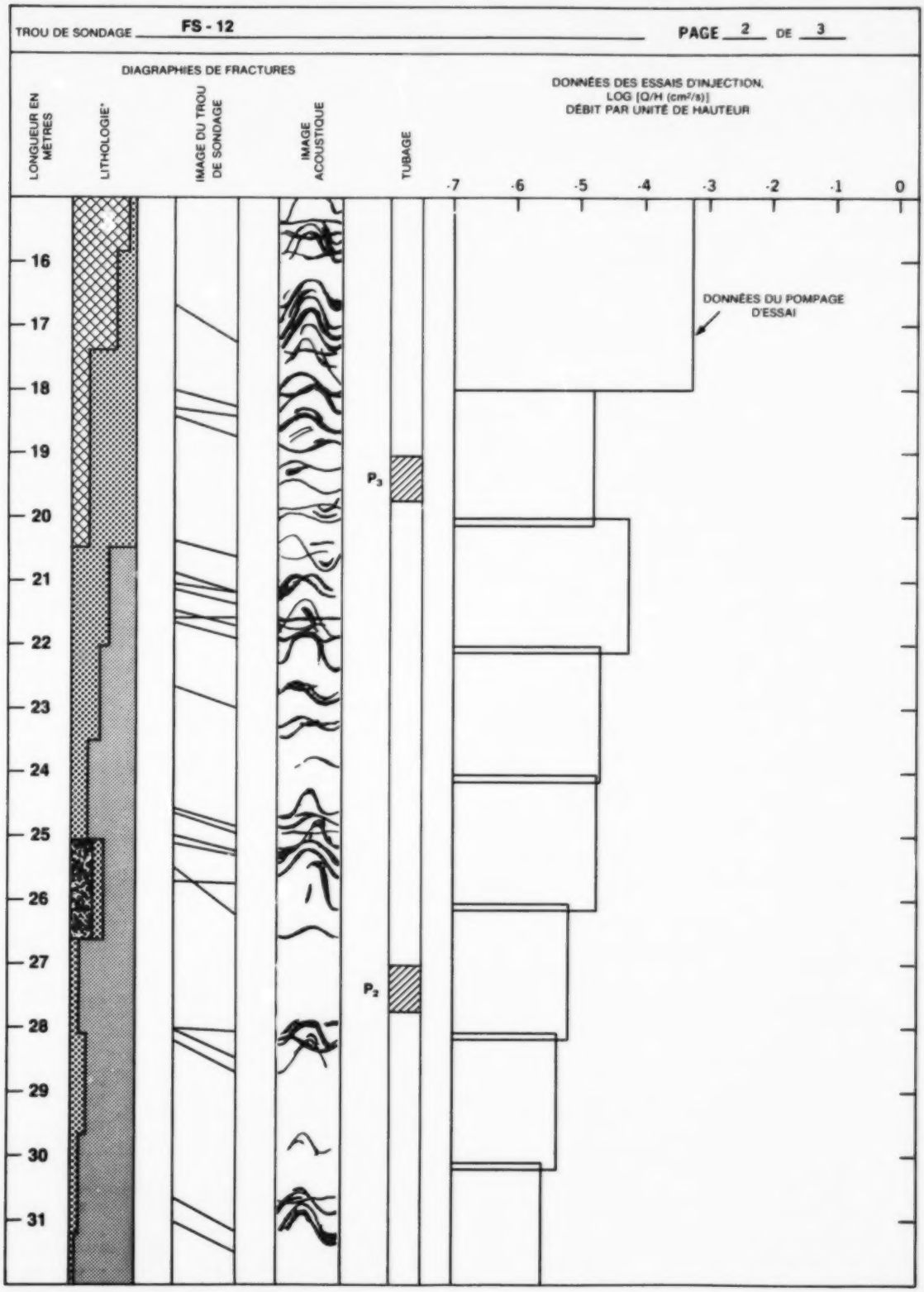

TROU DE SONDAGE FS - 10
PAGE 3 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
P1
FOND DU TROU = 48.75 m SST

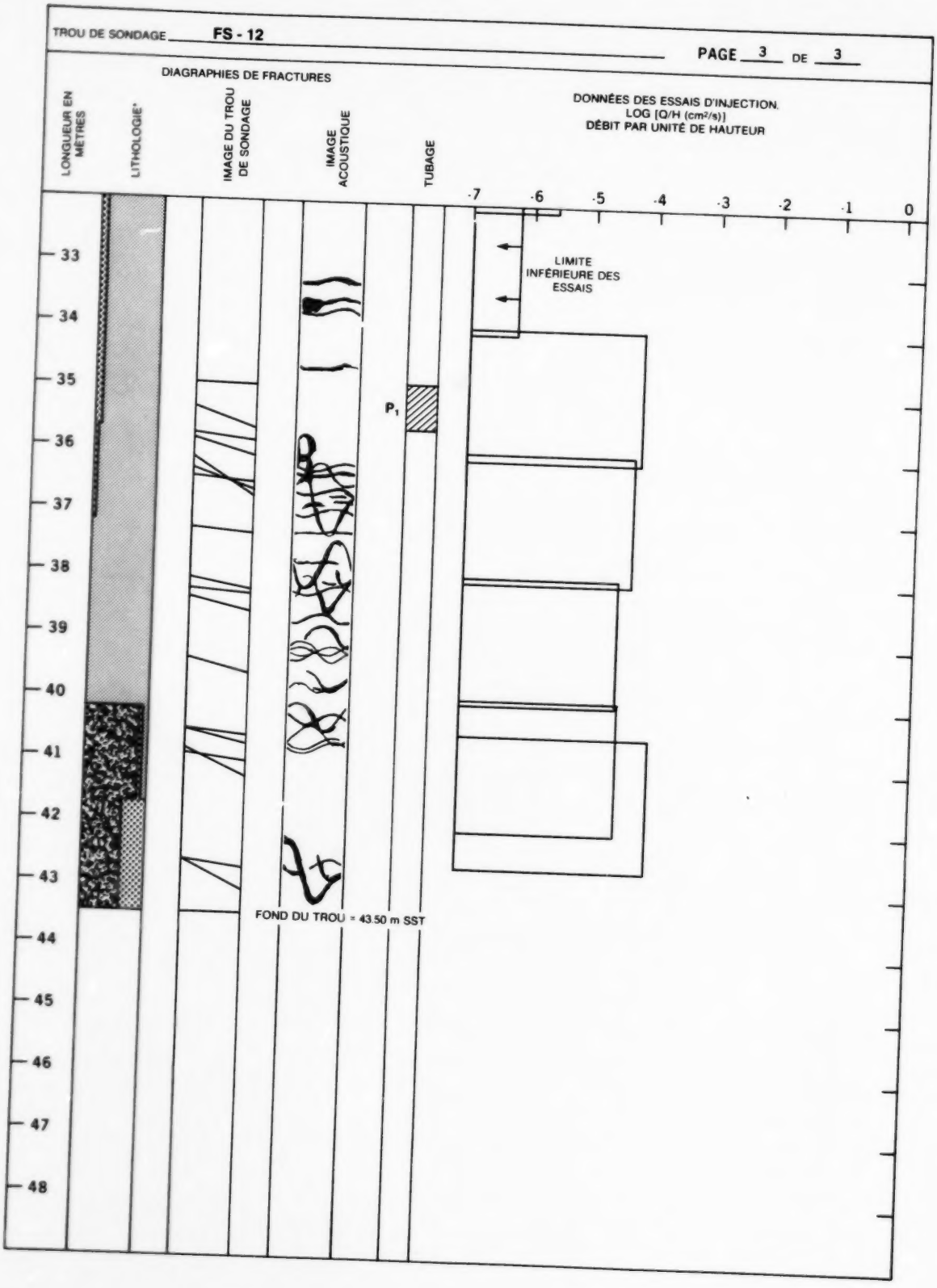

TROU DE SONDAGE FS - 11
ORIENTATION DIRECTION 0°, INCLINAISON 69°
ALTITUDE DU TUBAGE 135.22 m (443.62')
PAGE 1 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
NON ENREGISTRÉ
P5
P4
TUBAGE À LA SURFACE EN PVC
N.S.E. DANS TROUS SANS TUBAGE
LIMITE INFÉRIEURE DES ESSAIS
* ÉCHANTILLONNAGE DE FRAGMENTS À 1.5 m D'INTERVALLE
MONZONITE
PEGMATITE
MÉTAGABBRO

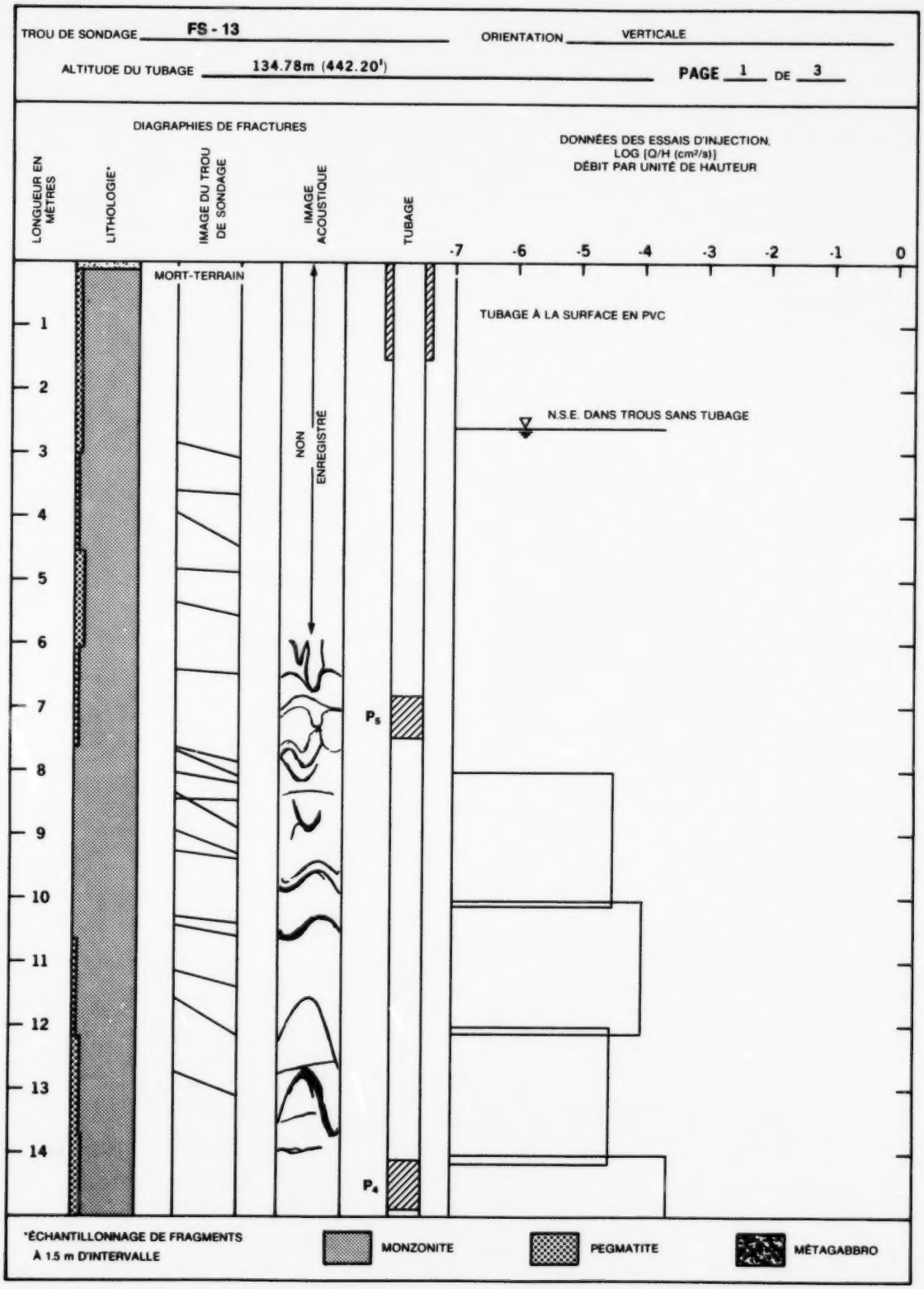

TROU DE SONDAGE FS - 11
PAGE 2 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION
LOG [Q H (cm² s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
LIMITE INFÉRIEURE DES ESSAIS
P3
P2

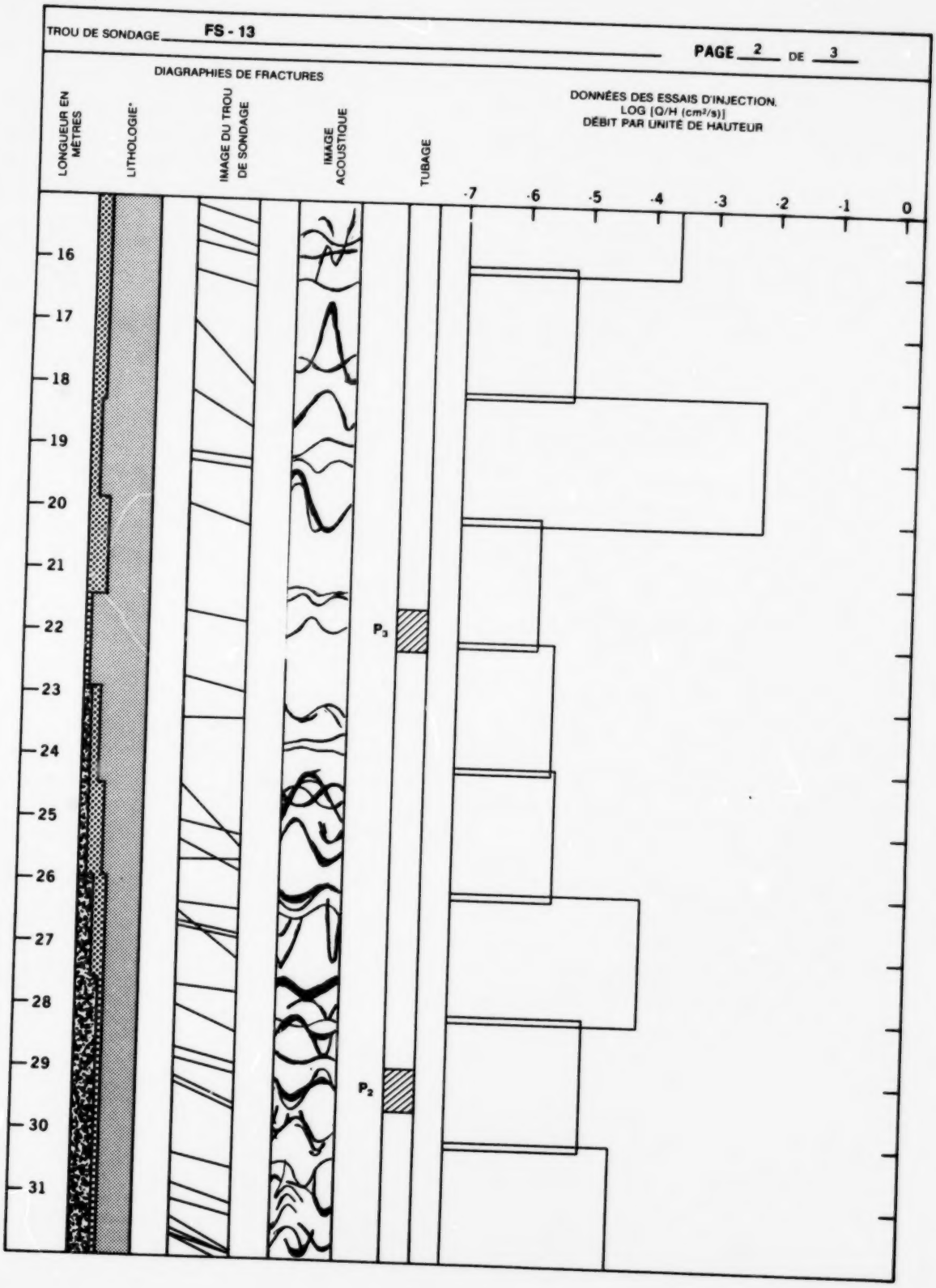

TROU DE SONDAGE FS - 11
PAGE 3 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION.
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
·7
·6
·5
·4
·3
·2
·1
0
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
P1
FOND DU TROU = 43.53 m SST

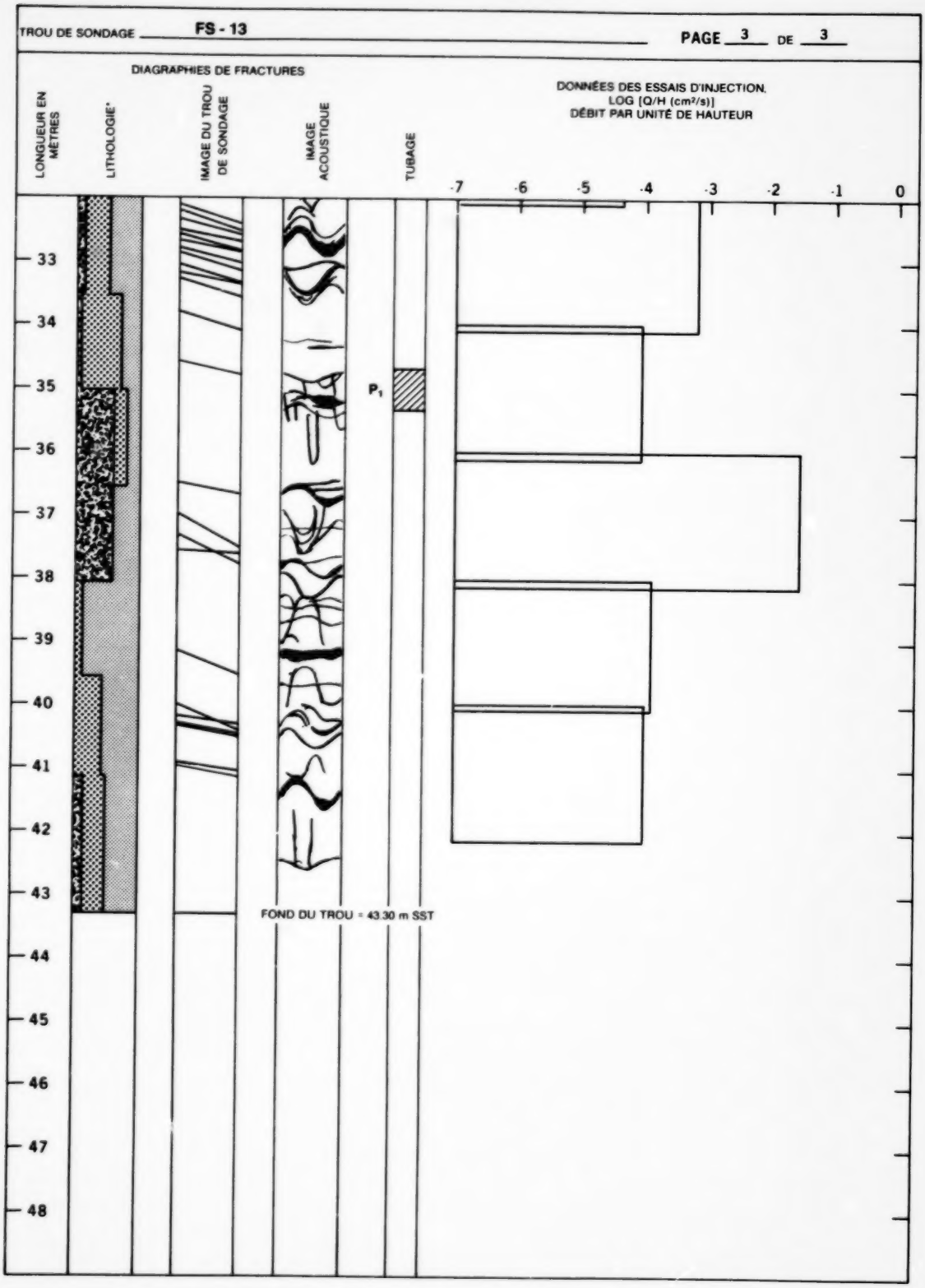

TROU DE SONDAGE FS - 12
ORIENTATION VERTICALE
ALTITUDE DU TUBAGE 135.01 m (442.93')
PAGE 1 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION.
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
N.S.E. DANS TROU SANS TUBAGE
TUBAGE À LA SURFACE EN PVC
P4
DONNÉES DU POMPAGE D'ESSAI
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
*ÉCHANTILLONNAGE DE FRAGMENTS À 1.5 m D'INTERVALLE
MONZONITE
PEGMATITE
DIABASE
MÉTAGABBRO

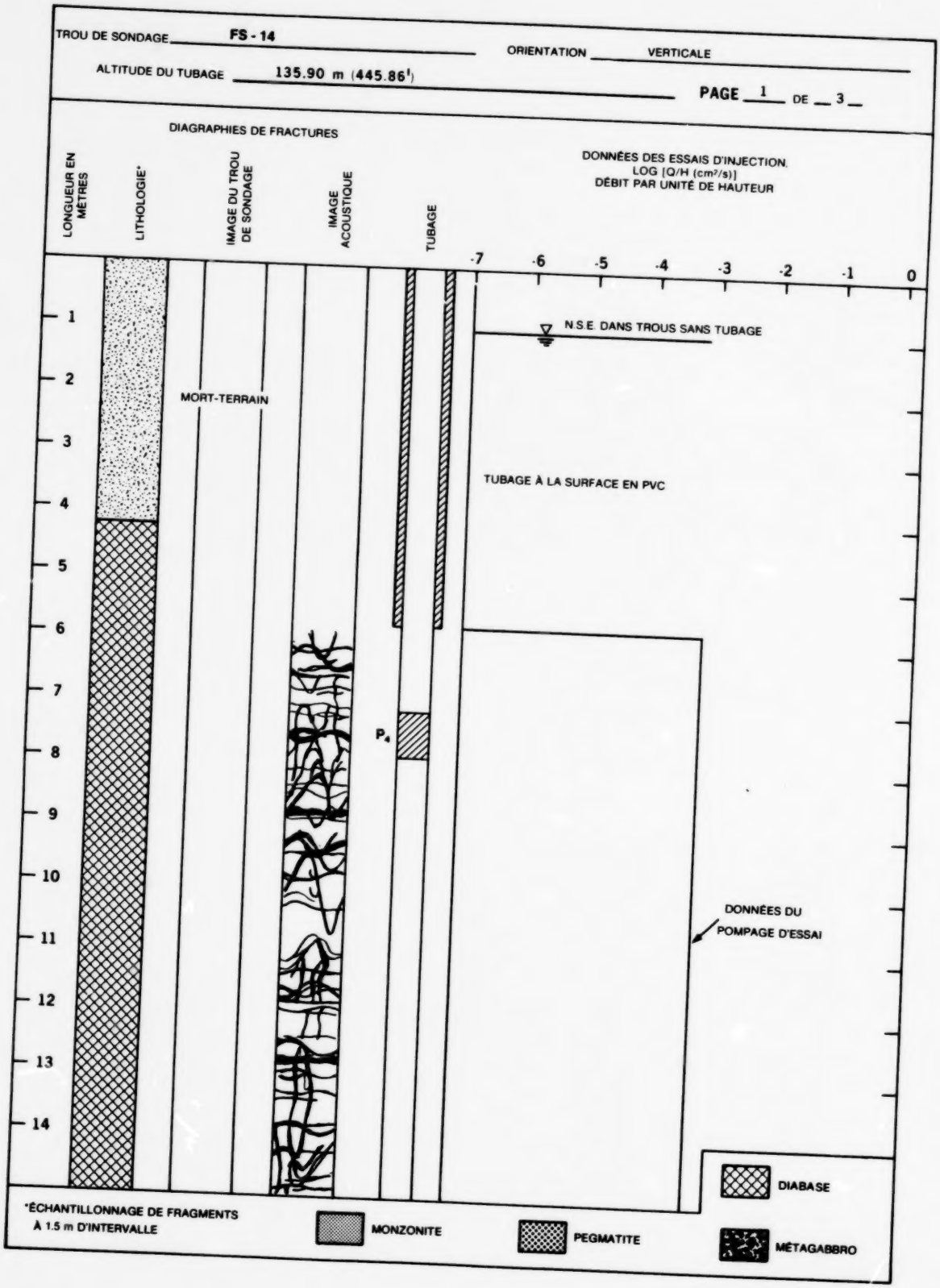

TROU DE SONDAGE FS - 12
PAGE 2 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION, LOG [Q/H (cm²/s)] DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
P3
P2
DONNÉES DU POMPAGE D'ESSAI

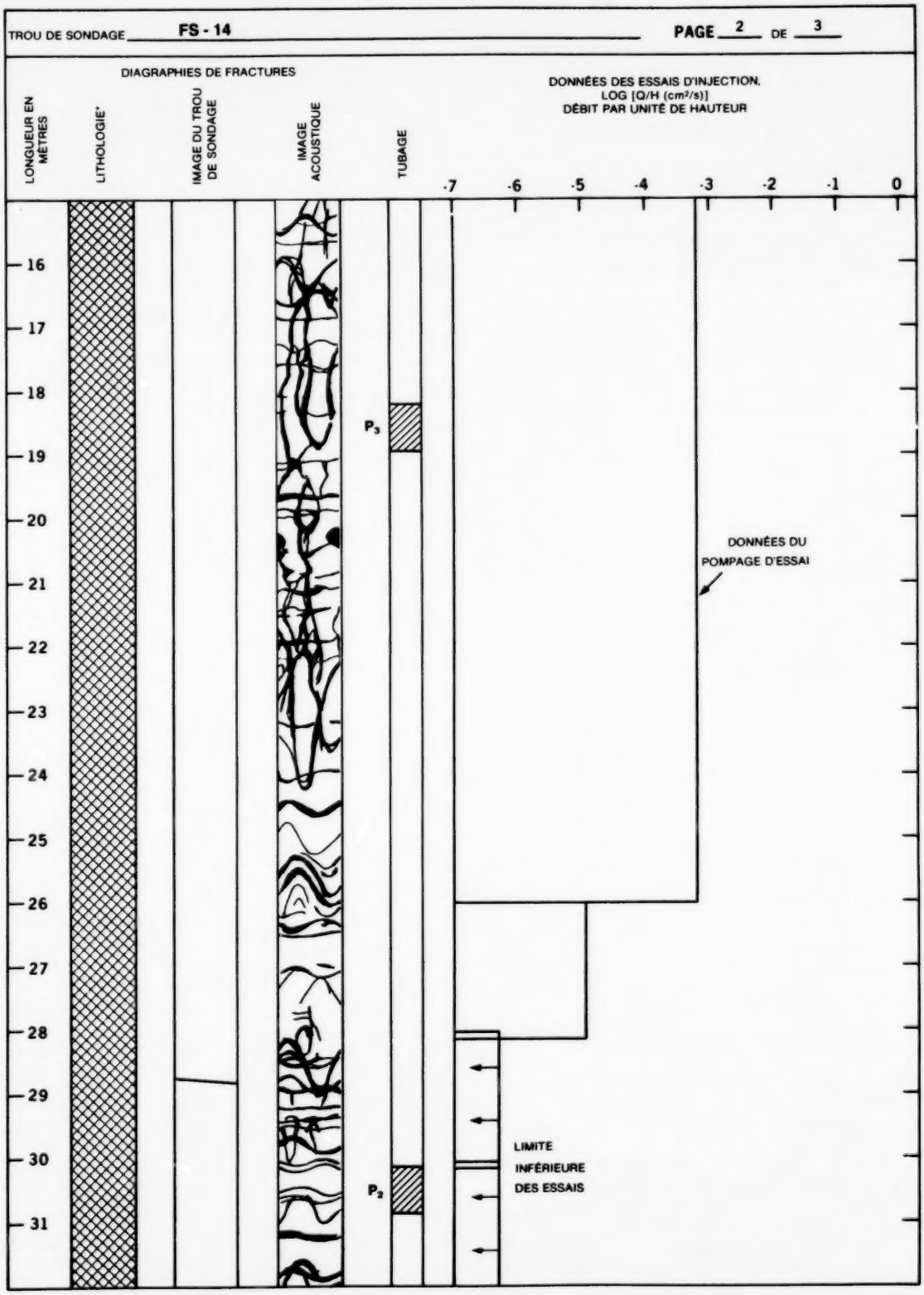

TROU DE SONDAGE FS - 12
PAGE 3 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION.
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
LIMITE INFÉRIEURE DES ESSAIS
P1
FOND DU TROU = 43.50 m SST

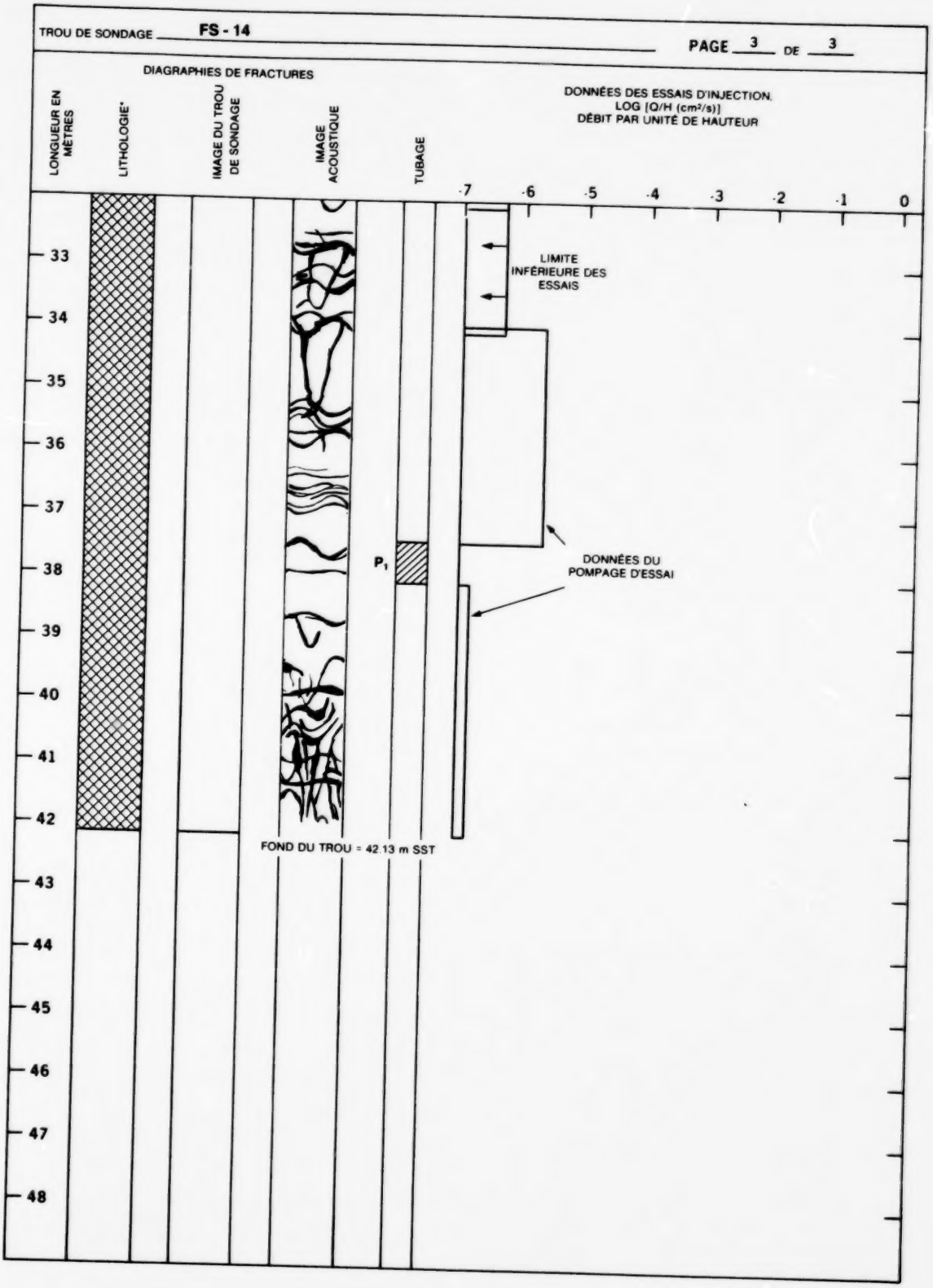

TROU DE SONDAGE FS - 13
ORIENTATION VERTICALE
ALTITUDE DU TUBAGE 134.78m (442.20')
PAGE 1 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION,
LOG {Q/H (cm²/s)}
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
MORT-TERRAIN
NON ENREGISTRÉ
TUBAGE À LA SURFACE EN PVC
N.S.E. DANS TROUS SANS TUBAGE
P5
P4
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
*ÉCHANTILLONNAGE DE FRAGMENTS
À 1.5 m D'INTERVALLE
MONZONITE
PEGMATITE
MÉTAGABBRO


TROU DE SONDAGE FS - 13
PAGE 2 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION.
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
P3
P2


TROU DE SONDAGE FS - 13
PAGE 3 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION,
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
P1
FOND DU TROU = 43.30 m SST

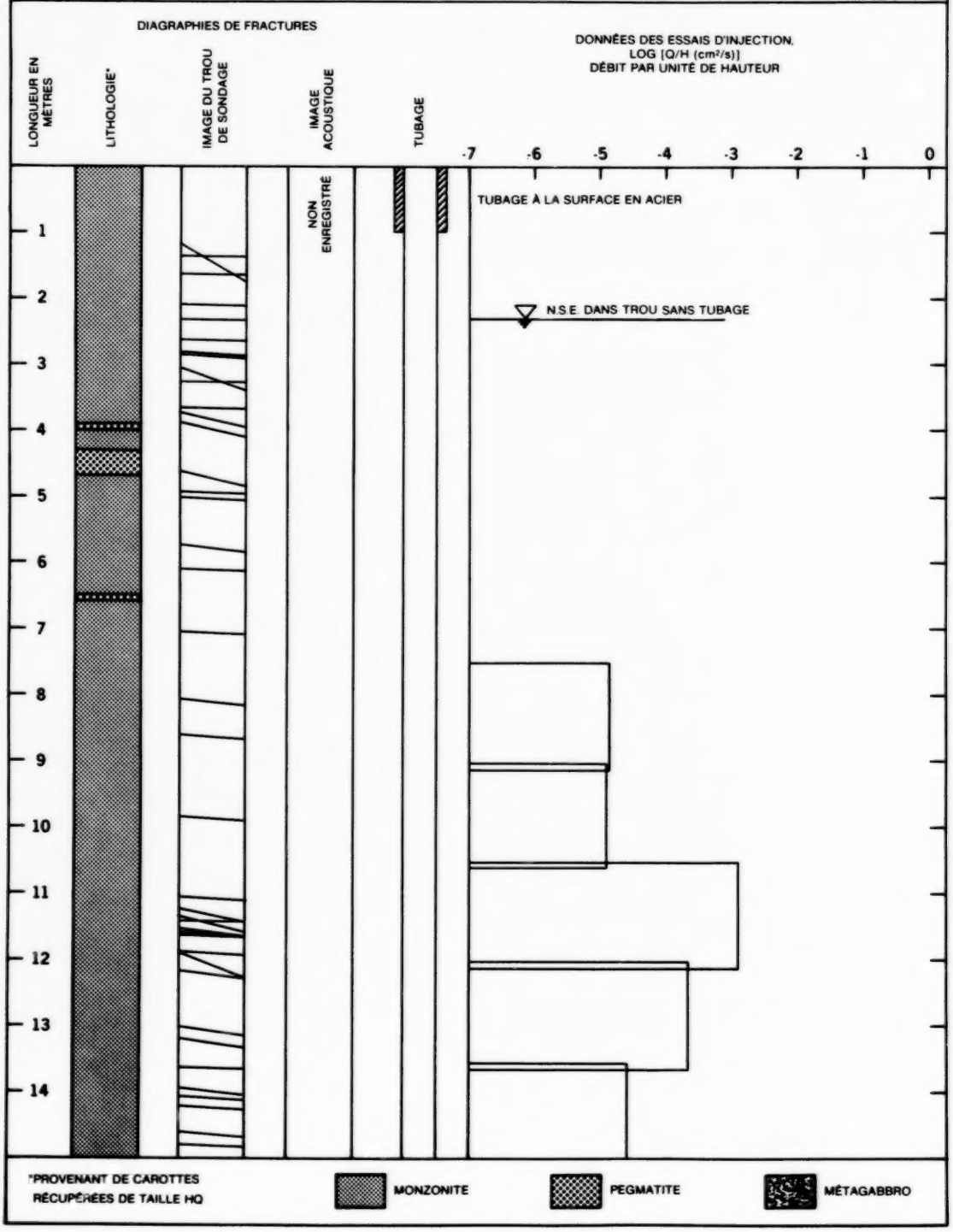

TROU DE SONDAGE FS - 14
ORIENTATION VERTICALE
ALTITUDE DU TUBAGE 135.90 m (445.86')
PAGE 1 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
-7 -6 -5 -4 -3 -2 -1 0
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
N.S.E. DANS TROUS SANS TUBAGE
MORT-TERRAIN
TUBAGE À LA SURFACE EN PVC
P4
DONNÉES DU POMPAGE D'ESSAI
*ÉCHANTILLONNAGE DE FRAGMENTS À 1.5 m D'INTERVALLE
MONZONITE
PEGMATITE
DIABASE
MÉTAGABBRO

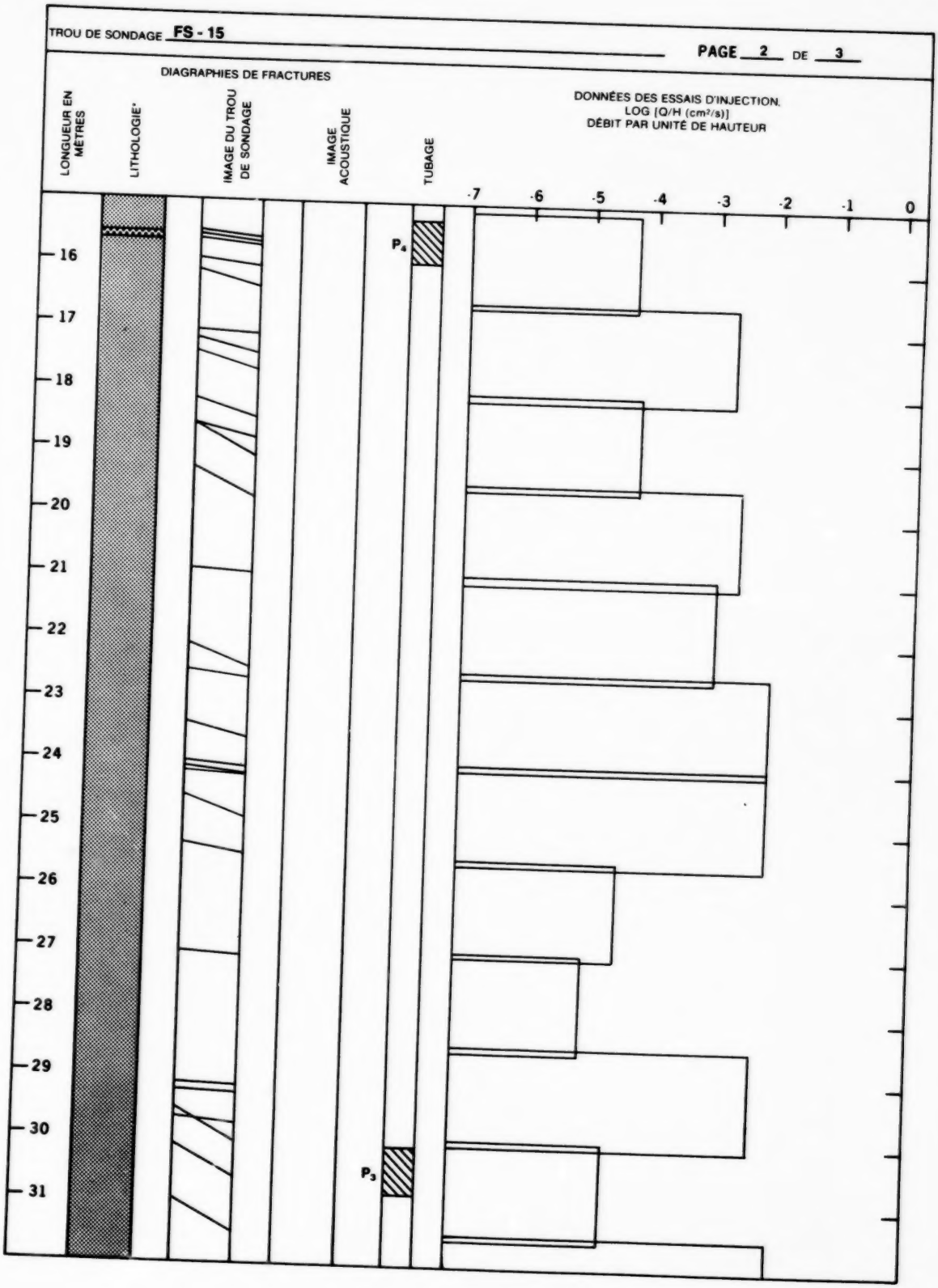

TROU DE SONDAGE FS - 14
PAGE 2 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION.
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
P3
P2
DONNÉES DU POMPAGE D'ESSAI
LIMITE INFÉRIEURE DES ESSAIS

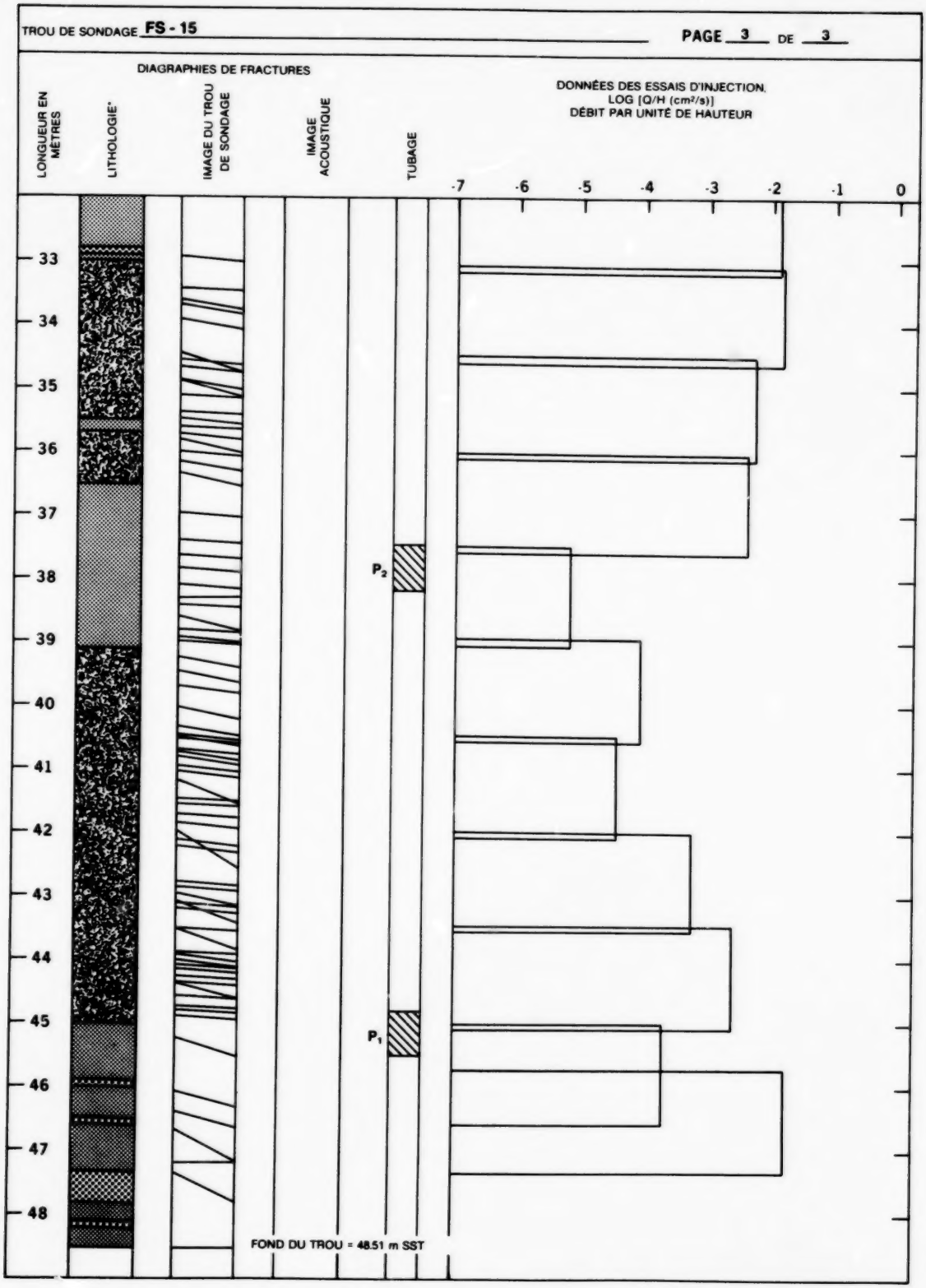

TROU DE SONDAGE FS - 14
PAGE 3 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION.
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
LIMITE INFÉRIEURE DES ESSAIS
P1
DONNÉES DU POMPAGE D'ESSAI
FOND DU TROU = 42.13 m SST

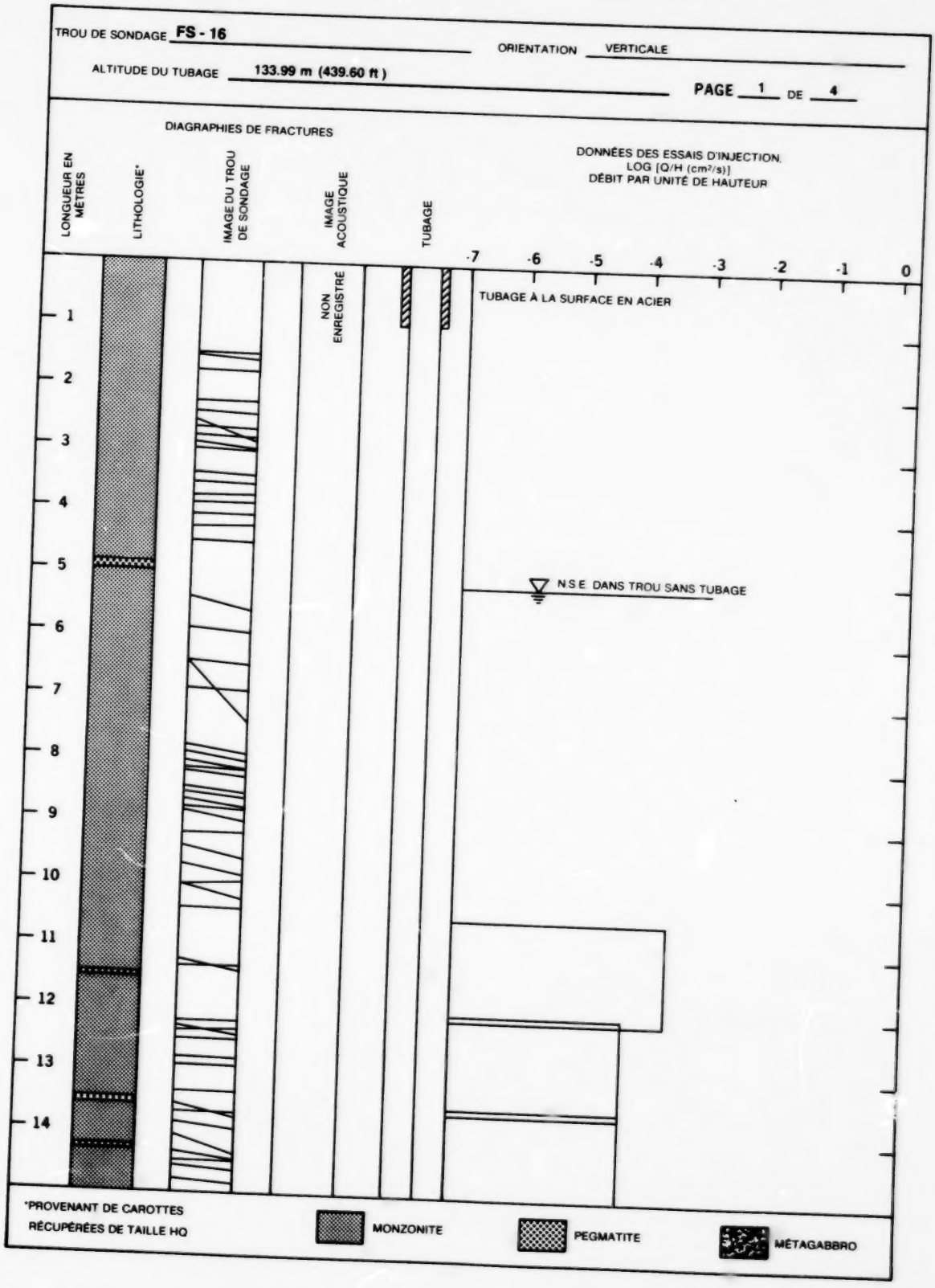
TROU DE SONDAGE **FS - 15** ORIENTATION VERTICALE

ALTITUDE DU TUBAGE **134.23 m (440.39 pi.)** PAGE 1 DE 3

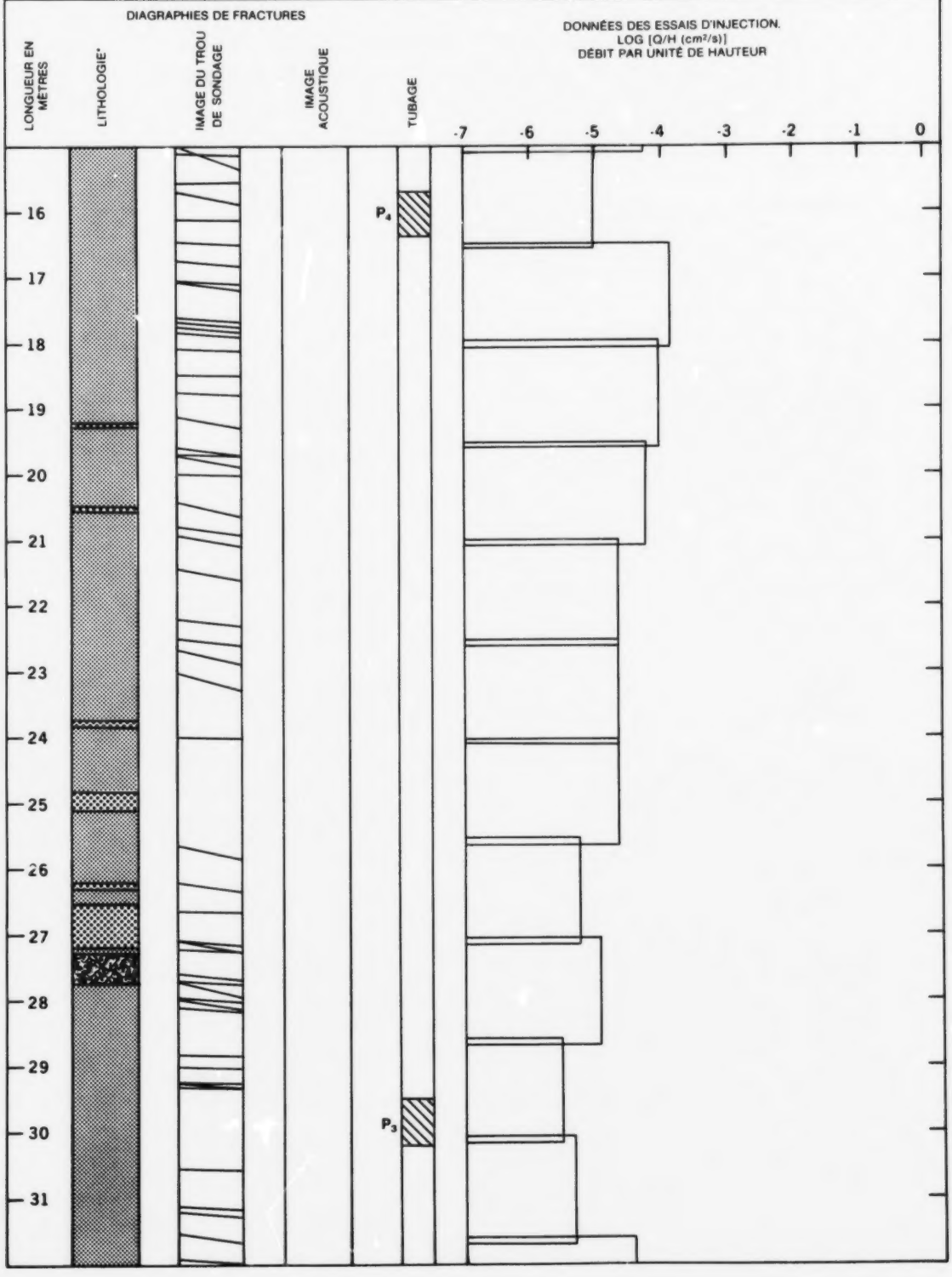


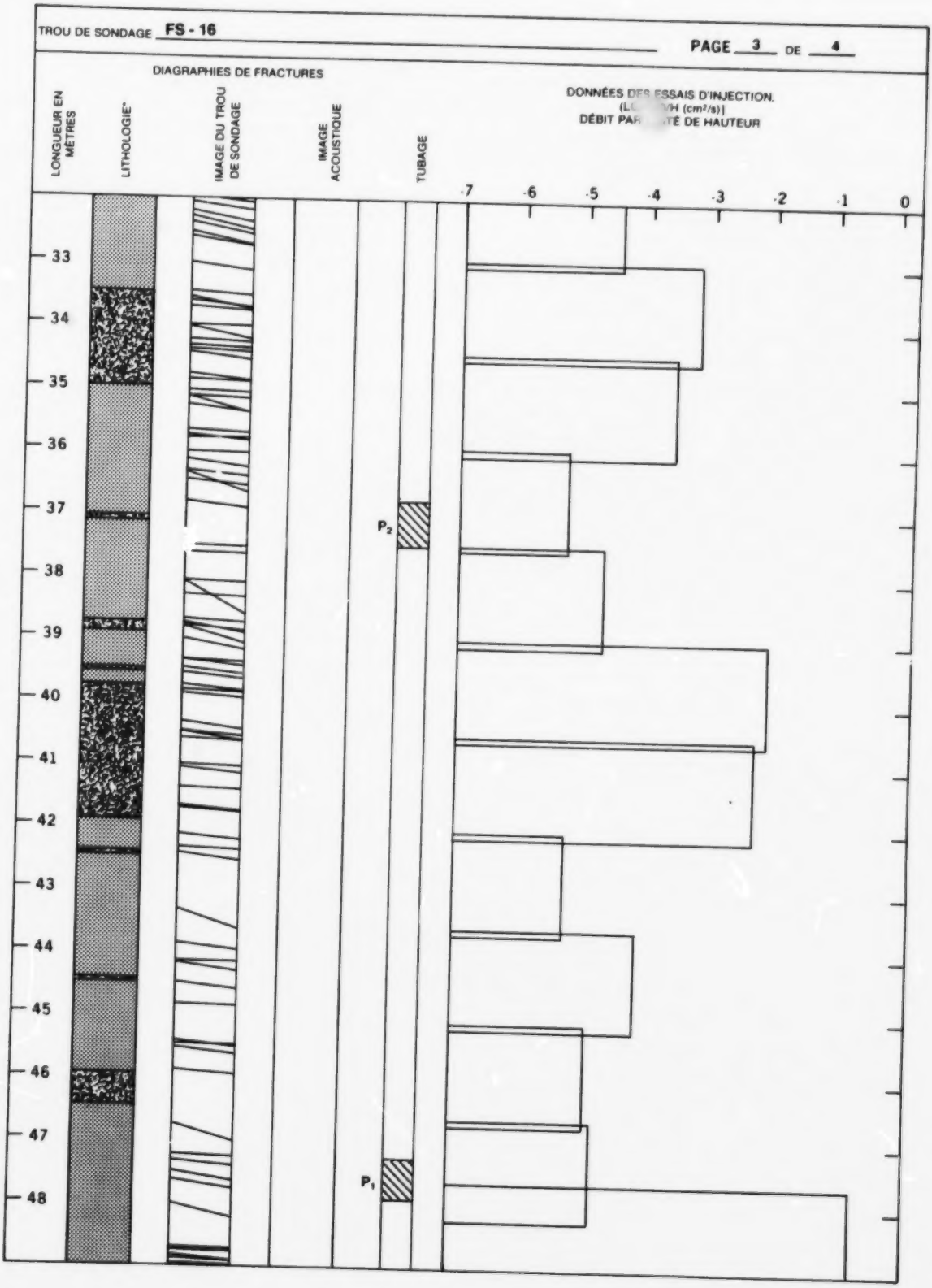

TROU DE SONDAGE FS - 15
PAGE 2 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION.
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
P4
P3

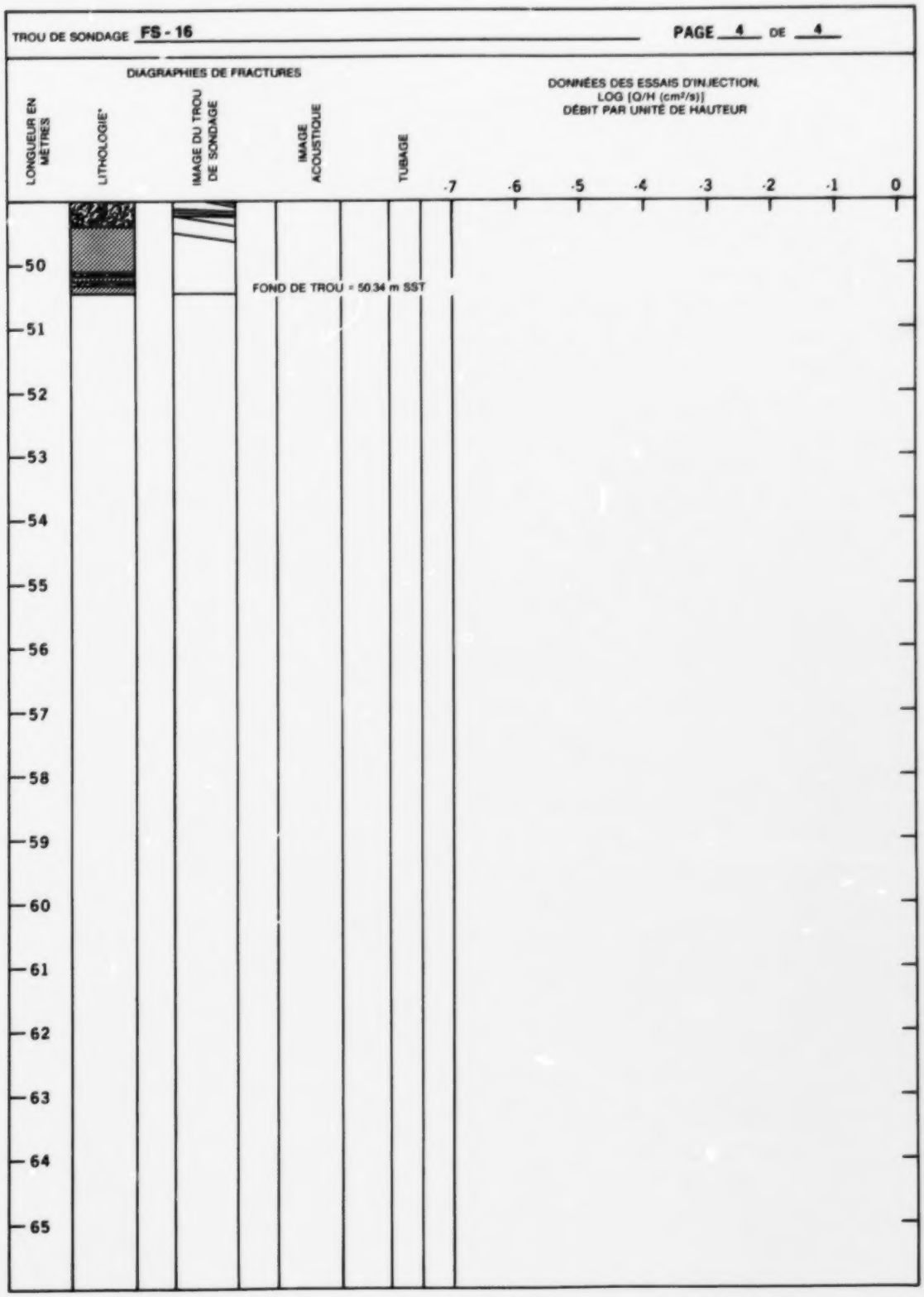

TROU DE SONDAGE FS - 15
PAGE 3 DE 3
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION.
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
P2
P1
FOND DU TROU = 48.51 m SST

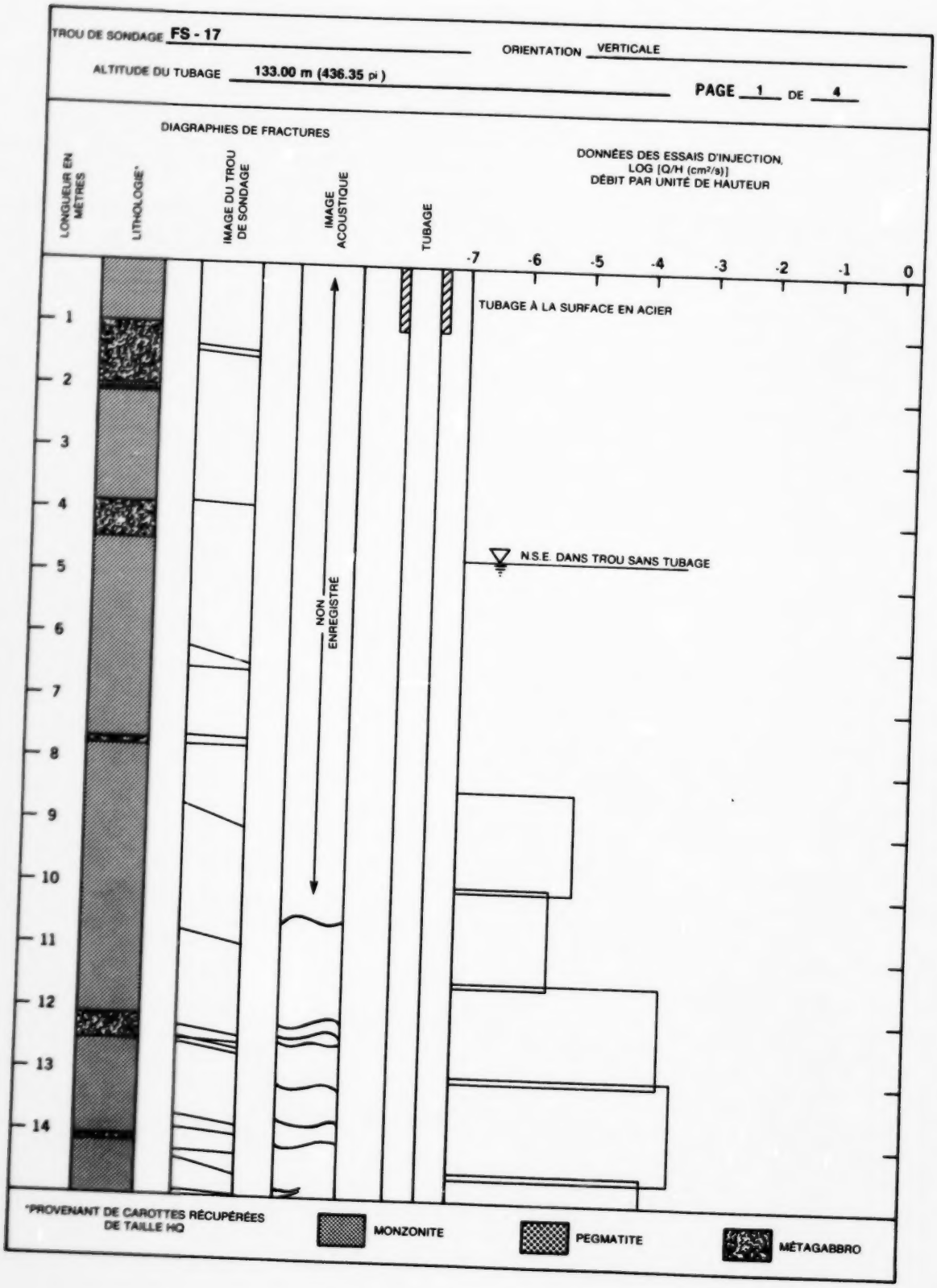

TROU DE SONDAGE FS - 16
ORIENTATION VERTICALE
ALTITUDE DU TUBAGE 133.99 m (439.60 ft)
PAGE 1 DE 4
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION.
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
-7 -6 -5 -4 -3 -2 -1 0
NON ENREGISTRÉ
TUBAGE À LA SURFACE EN ACIER
N.S.E. DANS TROU SANS TUBAGE
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
*PROVENANT DE CAROTTES RÉCUPÉRÉES DE TAILLE HQ
MONZONITE
PEGMATITE
MÉTAGABBRO

TROU DE SONDAGE FS - 16 PAGE 2 DE 4

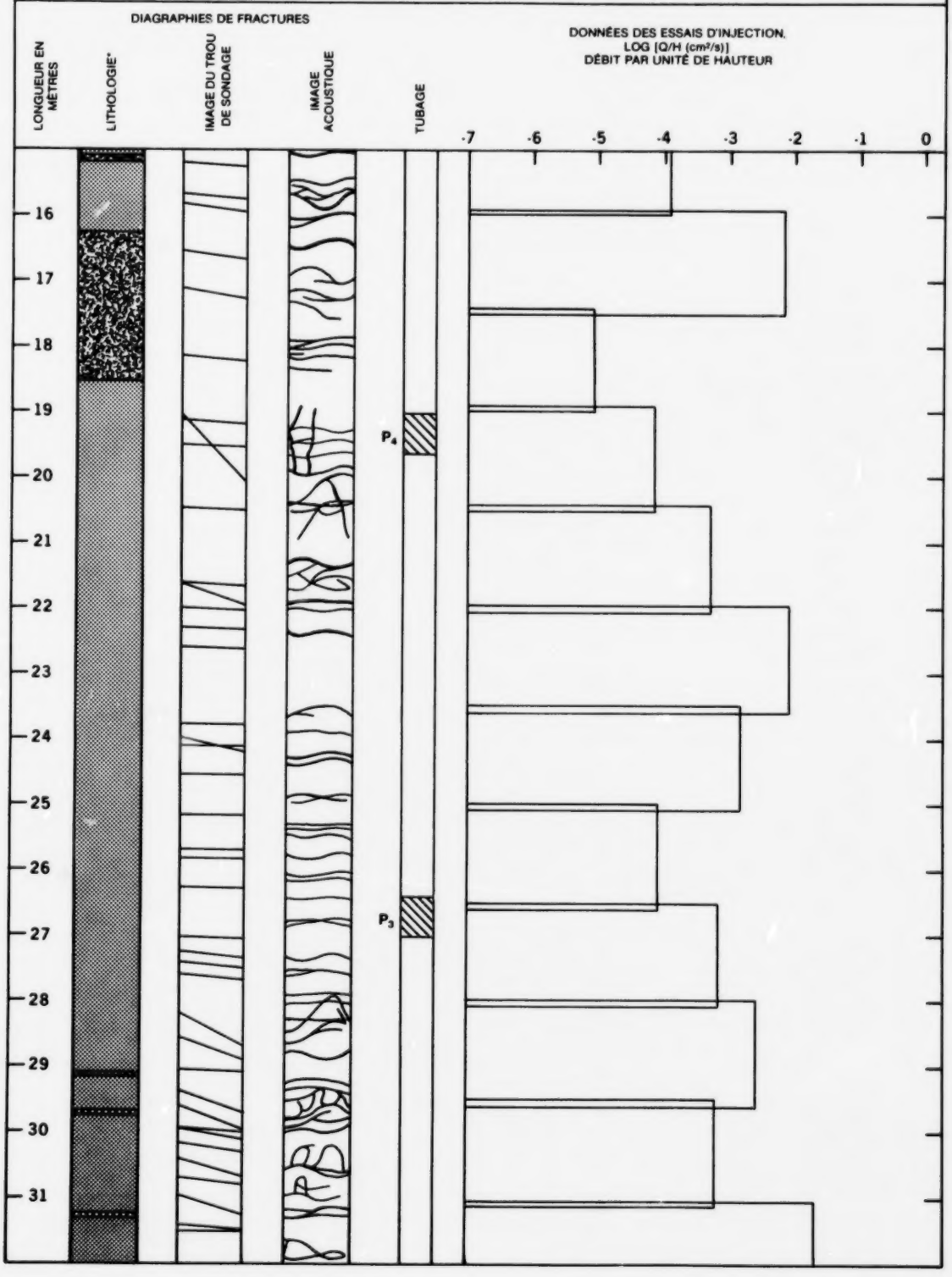


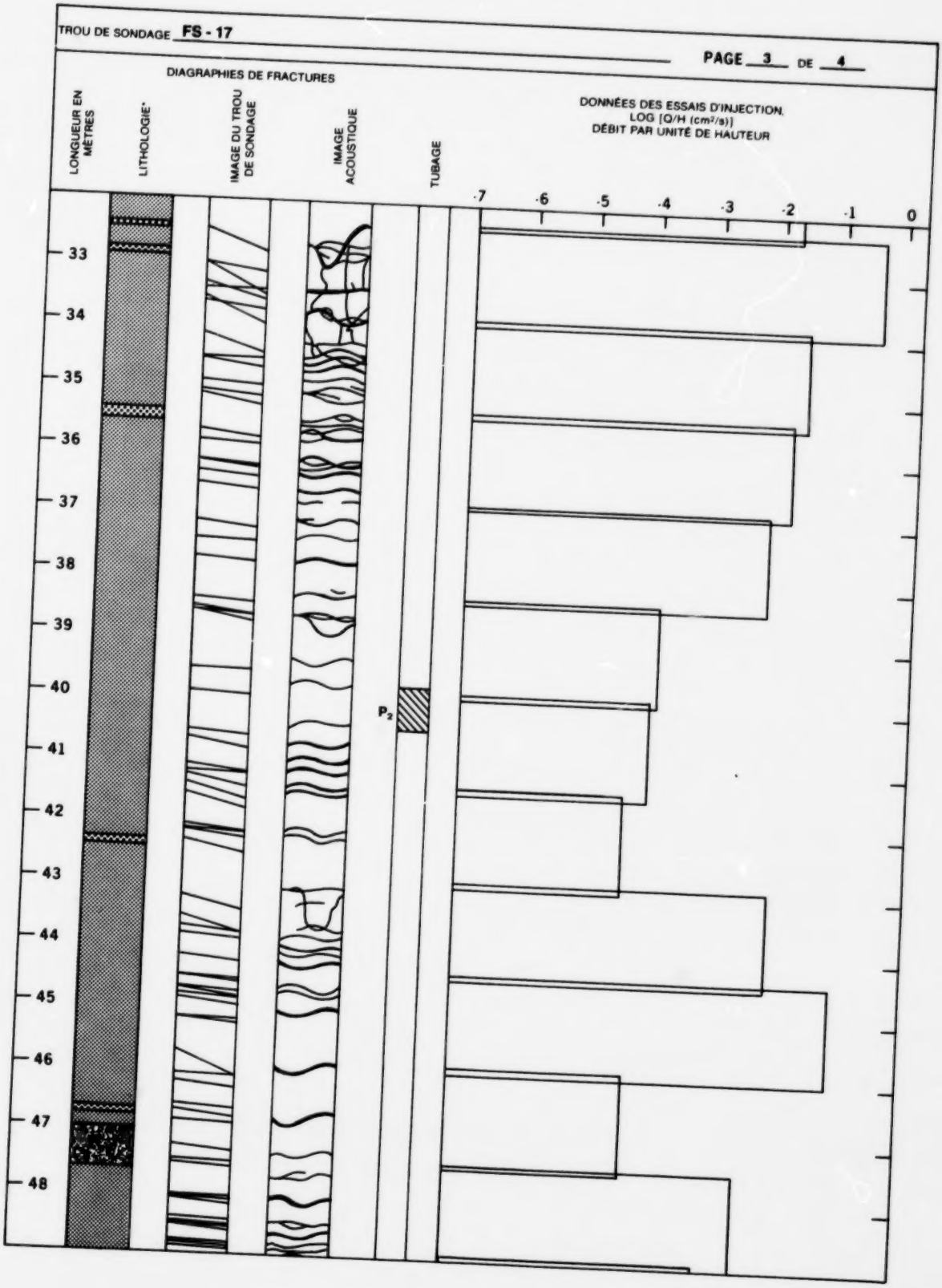

TROU DE SONDAGE FS - 16
PAGE 3 DE 4
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
·7 ·6 ·5 ·4 ·3 ·2 ·1 0
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
P2
P1

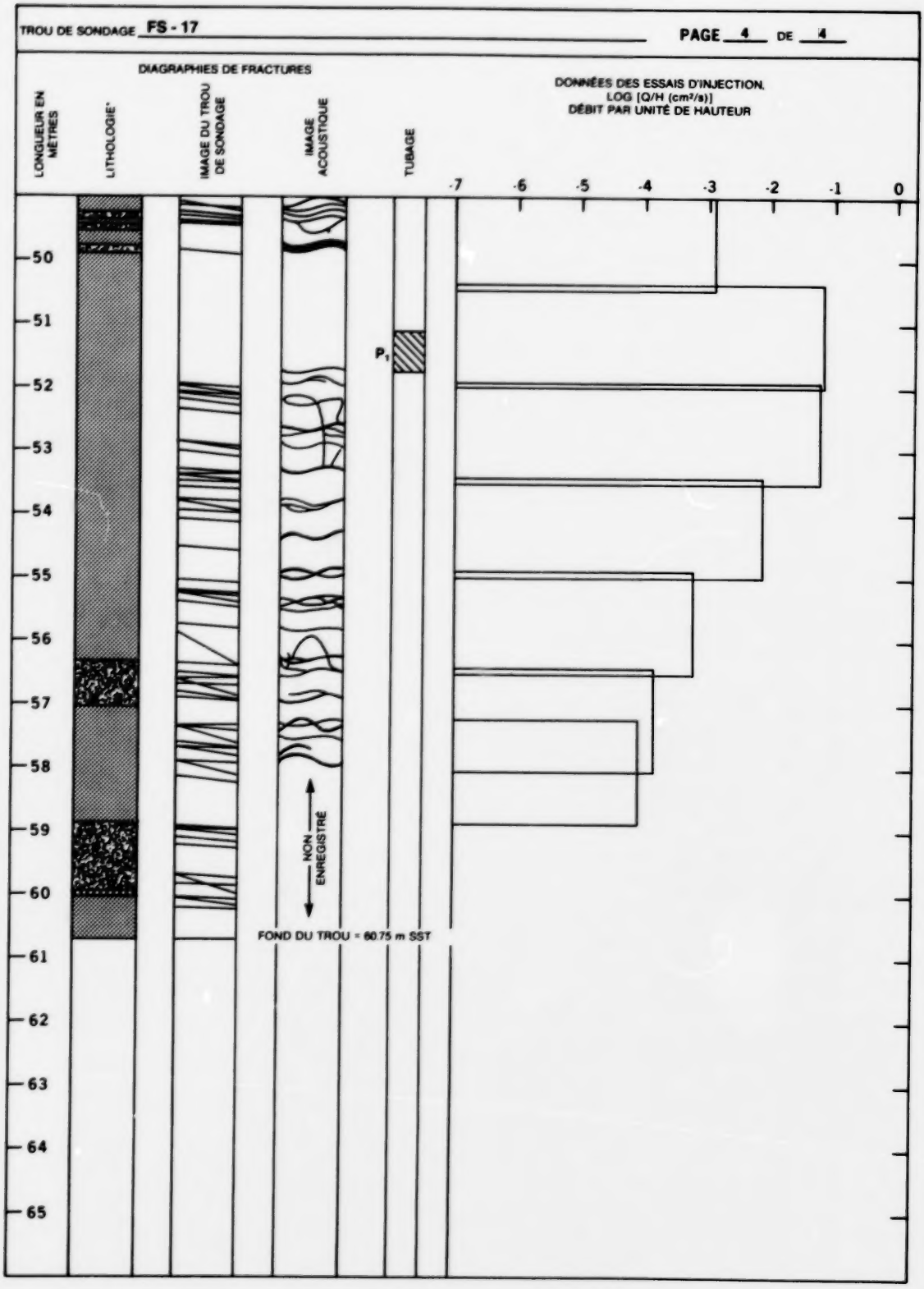

TROU DE SONDAGE FS - 16
PAGE 4 DE 4
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
FOND DE TROU = 50.34 m SST


TROU DE SONDAGE FS - 17
ORIENTATION VERTICALE
ALTITUDE DU TUBAGE 133.00 m (436.35 pi)
PAGE 1 DE 4
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION, LOG [Q/H (cm²/s)] DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
TUBAGE À LA SURFACE EN ACIER
N.S.E. DANS TROU SANS TUBAGE
NON ENREGISTRÉ
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
*PROVENANT DE CAROTTES RÉCUPÉRÉES DE TAILLE HQ
MONZONITE
PEGMATITE
MÉTAGABBRO

TROU DE SONDAGE FS - 17 PAGE 2 DE 4




TROU DE SONDAGE FS - 17
PAGE 3 DE 4
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION.
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
P2


TROU DE SONDAGE FS - 17
PAGE 4 DE 4
DIAGRAPHIES DE FRACTURES
LONGUEUR EN MÈTRES
LITHOLOGIE*
IMAGE DU TROU DE SONDAGE
IMAGE ACOUSTIQUE
TUBAGE
DONNÉES DES ESSAIS D'INJECTION.
LOG [Q/H (cm²/s)]
DÉBIT PAR UNITÉ DE HAUTEUR
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
P1
NON ENREGISTRÉ
FOND DU TROU = 60.75 m SST

Annexe B

Données des essais d'injection à packer double, Trous de sondage FS-1 à FS-17

Tableau B-1. Sommaire des essais d'injection, trou d'essai FS-1

Profondeur de l'intervalle d'essai (m S.S.T.*)	Hauteur d'injection ΔH (m)	Débit Q ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Débit par unité de hauteur Q/ΔH ($m^2 \cdot s^{-1}$)
4.00- 6.27	18.6	1.0×10^{-8}	5.5×10^{-10}
6.00- 8.27	18.3	4.1×10^{-9}	2.2×10^{-10}
8.00-10.27	18.8	2.1×10^{-7}	1.1×10^{-8}
10.00-12.27	19.0	1.1×10^{-7}	5.7×10^{-9}
12.00-14.27	18.7	1.7×10^{-8}	9.1×10^{-10}
14.00-16.27	18.3	2.7×10^{-8}	1.5×10^{-9}
16.00-18.27	18.3	3.4×10^{-8}	1.9×10^{-9}
18.00-20.27	17.8	5.7×10^{-8}	3.2×10^{-9}
20.00-22.27	17.8	7.6×10^{-8}	4.3×10^{-9}
22.00-24.27	18.7	6.7×10^{-7}	3.4×10^{-8}
24.00-26.27	18.8	6.2×10^{-7}	3.3×10^{-8}
26.00-28.27	18.3	6.7×10^{-8}	3.7×10^{-9}
28.00-30.27	18.0	7.9×10^{-8}	4.4×10^{-9}
30.00-32.27	17.5	8.0×10^{-8}	4.6×10^{-9}
32.00-34.27	18.4	1.9×10^{-8}	1.1×10^{-9}
34.00-36.27	17.3	2.5×10^{-8}	1.4×10^{-9}
36.00-38.27	18.3	1.9×10^{-8}	1.1×10^{-9}
38.00-40.27	17.3	7.6×10^{-10}†	4.4×10^{-11}
40.00-42.27	18.1	1.1×10^{-8}	5.9×10^{-10}

* Sous le sommet du tubage.
† Débit minimum mesurable.

Tableau B-2. Sommaire des essais d'injection, trou d'essai FS-2

Profondeur de l'intervalle d'essai (m S.S.T.*)	Hauteur d'injection ΔH (m)	Débit Q ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Débit par unité de hauteur Q/ΔH ($m^2 \cdot s^{-1}$)
4.00- 6.27	15.5	5.9×10^{-7}	3.8×10^{-8}
6.00- 8.27	15.6	5.7×10^{-9}	3.6×10^{-10}
8.00-10.27	15.7	5.0×10^{-9}	3.1×10^{-10}
10.00-12.27	15.5	1.2×10^{-8}	7.7×10^{-10}
12.00-14.27	15.2	6.2×10^{-7}	4.1×10^{-8}
14.00-16.27	14.8	4.3×10^{-8}	2.9×10^{-9}
16.00-18.27	14.3	1.3×10^{-8}	8.8×10^{-10}
18.00-20.27	14.5	5.3×10^{-9}	3.7×10^{-10}
20.00-22.27	10.4	1.1×10^{-5}	1.1×10^{-6}
22.00-24.27	14.7	7.6×10^{-9}	5.2×10^{-10}
24.00-26.27	15.2	3.8×10^{-10}†	2.5×10^{-11}
26.00-28.27	14.8	3.7×10^{-8}	2.5×10^{-9}
28.00-30.27	18.1	3.8×10^{-10}†	2.1×10^{-11}
30.00-32.27	15.7	3.8×10^{-9}	2.4×10^{-10}
32.00-34.27	15.8	9.1×10^{-9}	5.8×10^{-10}
34.00-36.27	15.6	2.7×10^{-8}	1.7×10^{-9}
36.00-38.27	16.1	1.2×10^{-8}	7.5×10^{-10}
38.00-40.27	16.3	5.2×10^{-9}	3.2×10^{-10}
40.00-42.27	16.5	4.7×10^{-9}	2.8×10^{-10}

* Sous le sommet du tubage.
† Débit minimum mesurable.

Tableau B-3. Sommaire des essais d'injection, trou d'essai FS-3

Profondeur de l'intervalle d'essai (m S.S.T.*)	Hauteur d'injection ΔH (m)	Débit Q ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Débit par unité de hauteur Q/ΔH ($m^2 \cdot s^{-1}$)
4.00- 6.27	8.50	1.9×10^{-9}	2.3×10^{-10}
6.00- 8.27	9.60	3.8×10^{-10} †	4.0×10^{-11}
8.00-10.27	9.20	2.3×10^{-8}	2.5×10^{-9}
10.00-12.27	15.6	1.6×10^{-8}	1.0×10^{-9}
12.00-14.27	15.5	6.3×10^{-8}	4.1×10^{-9}
14.00-16.27	16.2	6.4×10^{-9}	3.9×10^{-10}
16.00-18.27	17.5	1.3×10^{-8}	7.4×10^{-10}
18.00-20.27	15.4	6.0×10^{-8}	3.9×10^{-9}
20.00-22.27	15.5	3.0×10^{-9}	2.0×10^{-10}
22.00-24.27	18.0	3.6×10^{-9}	2.0×10^{-10}
24.00-26.27	15.6	1.0×10^{-8}	6.5×10^{-10}
26.00-28.27	16.4	7.2×10^{-7}	4.4×10^{-8}
28.00-30.27	16.4	6.4×10^{-7}	3.9×10^{-8}
30.00-32.27	16.0	1.5×10^{-8}	9.5×10^{-10}
32.00-34.27	16.4	2.3×10^{-9}	1.4×10^{-10}
34.00-36.27	15.8	2.9×10^{-8}	1.8×10^{-9}
36.00-38.27	15.8	9.9×10^{-8}	6.3×10^{-9}
38.20-40.47	15.3	3.5×10^{-7}	2.3×10^{-8}

* Sous le sommet du tubage.
† Débit minimum mesurable.

Tableau B-4. Sommaire des essais d'injection, trou d'essai FS-4

Profondeur de l'intervalle d'essai (m S.S.T.*)	Hauteur d'injection ΔH (m)	Débit Q ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Débit par unité de hauteur Q/ΔH ($m^2 \cdot s^{-1}$)
4.00- 6.02	9.70	3.8×10^{-10} †	3.9×10^{-11}
6.00- 8.27	14.4	5.7×10^{-9}	3.9×10^{-10}
8.00-10.27	14.9	1.1×10^{-9}	7.3×10^{-11}
10.00-12.27	3.80	3.9×10^{-5}	1.0×10^{-5}
12.00-14.27	4.10	3.3×10^{-5}	7.9×10^{-6}
14.00-16.27	9.30	1.7×10^{-5}	1.8×10^{-6}
16.00-18.27	9.70	1.8×10^{-5}	1.9×10^{-6}
18.00-20.27	13.0	5.2×10^{-6}	4.0×10^{-7}
20.00-22.27	14.1	3.1×10^{-7}	2.2×10^{-8}
22.00-24.27	15.4	2.9×10^{-8}	1.9×10^{-9}
24.00-26.27	12.5	1.3×10^{-5}	1.0×10^{-6}
26.00-28.27	14.0	1.7×10^{-6}	1.2×10^{-7}
28.00-30.27	14.9	1.9×10^{-7}	1.2×10^{-8}
30.00-32.27	12.9	1.3×10^{-5}	1.0×10^{-6}
32.00-34.27	14.1	3.1×10^{-8}	2.2×10^{-9}
34.00-42.50	17.6	3.0×10^{-8}	1.7×10^{-9}

* Sous le sommet du tubage.
† Débit minimum mesurable.

Tableau B-5. Sommaire des essais d'injection, trou d'essai FS-5

Profondeur de l'intervalle d'essai (m S.S.T.*)	Hauteur d'injection ΔH (m)	Débit Q ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Débit par unité de hauteur Q/ΔH ($m^2 \cdot s^{-1}$)
4.00- 6.27	10.3	2.4×10^{-8}	2.3×10^{-7}
6.00- 8.27	15.4	1.9×10^{-8}	1.2×10^{-9}
8.00-10.27	15.4	2.6×10^{-8}	1.7×10^{-9}
10.00-12.27	15.7	9.0×10^{-8}	5.7×10^{-9}
12.00-14.27	15.5	1.7×10^{-8}	1.1×10^{-9}
14.00-16.27	15.5	2.2×10^{-8}	1.4×10^{-9}
16.00-18.27	15.5	1.9×10^{-8}	1.2×10^{-9}
18.00-20.27	15.4	1.8×10^{-8}	1.2×10^{-9}
20.00-22.27	15.4	1.6×10^{-8}	1.1×10^{-9}
22.00-24.27	15.2	2.0×10^{-8}	1.3×10^{-9}
24.00-26.27	15.2	2.7×10^{-8}	1.8×10^{-9}
26.00-28.27	14.8	5.7×10^{-8}	3.9×10^{-9}
28.00-30.27	15.5	1.2×10^{-7}	8.0×10^{-9}
30.00-32.27	16.7	9.9×10^{-9}	5.9×10^{-10}
32.00-34.27	18.1	7.9×10^{-9}	4.4×10^{-10}
34.00-36.27	16.8	8.0×10^{-9}	4.8×10^{-10}
36.00-38.27	18.8	5.4×10^{-7}	2.9×10^{-8}
38.00-40.27	18.5	1.0×10^{-6}	5.5×10^{-8}
40.00-41.60	0.30	1.7×10^{-7}	5.6×10^{-7}

* Sous le sommet du tubage.

Tableau B-6. Sommaire des essais d'injection, trou d'essai FS-6

Profondeur de l'intervalle d'essai (m S.S.T.*)	Hauteur d'injection ΔH (m)	Débit Q ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Débit par unité de hauteur Q/ΔH ($m^2 \cdot s^{-1}$)
6.00- 8.27	15.5	3.8×10^{-8}	2.5×10^{-9}
8.00-10.27	14.0	3.4×10^{-8}	2.4×10^{-9}
10.00-12.27	14.2	1.1×10^{-8}	8.0×10^{-10}
12.00-14.27	14.3	1.1×10^{-8}	8.0×10^{-10}
14.00-16.27	13.4	9.1×10^{-8}	6.8×10^{-9}
16.00-18.27	14.5	1.1×10^{-8}	7.2×10^{-10}
18.00-20.27	14.3	7.6×10^{-8}	5.3×10^{-9}
20.00-22.27	14.6	1.3×10^{-8}	8.8×10^{-10}
22.00-24.27	14.1	1.8×10^{-8}	1.2×10^{-9}
24.00-26.27	8.20	2.7×10^{-8}	3.3×10^{-9}
26.00-28.27	8.00	5.3×10^{-9}	6.7×10^{-10}
28.00-30.27	7.00	4.9×10^{-9}	7.1×10^{-10}
30.00-32.27	6.60	3.5×10^{-9}	1.4×10^{-9}
32.00-34.27	6.10	3.3×10^{-9}	5.4×10^{-8}
34.00-36.27	2.90	1.5×10^{-5}	5.1×10^{-4}
36.00-38.27	5.10	1.6×10^{-8}	3.1×10^{-9}
38.00-40.27	4.80	6.0×10^{-9}	1.3×10^{-9}

* Sous le sommet du tubage.

Tableau B-7. Sommaire des essais d'injection, trou d'essai FS-7

Profondeur de l'intervalle d'essai (m S.S.T.*)	Hauteur d'injection ΔH (m)	Débit Q ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Débit par unité de hauteur Q/ΔH ($m^2 \cdot s^{-1}$)
4.00- 6.10	19.0	2.6×10^{-6}	1.3×10^{-7}
6.00- 8.10	19.3	3.1×10^{-6}	1.6×10^{-7}
8.00-10.10	15.7	6.7×10^{-10} †	4.3×10^{-11}
10.00-12.10	19.7	2.7×10^{-8}	1.4×10^{-9}
12.00-14.10	20.3	2.4×10^{-8}	1.2×10^{-9}
14.00-16.10	20.2	1.7×10^{-8}	8.3×10^{-10}
16.00-18.10	6.20	6.1×10^{-9}	9.8×10^{-10}
18.00-20.10	6.30	1.5×10^{-8}	2.4×10^{-9}
20.00-22.10	21.6	8.7×10^{-8}	4.0×10^{-9}
22.00-24.10	22.1	6.9×10^{-8}	3.1×10^{-9}
24.00-26.10	21.2	1.4×10^{-7}	6.4×10^{-9}
26.00-28.10	22.1	1.9×10^{-8}	8.5×10^{-10}
28.00-30.10	22.9	1.8×10^{-8}	7.6×10^{-10}
30.00-32.10	23.5	3.9×10^{-8}	1.7×10^{-9}
32.00-34.10	21.6	2.6×10^{-6}	1.2×10^{-7}
34.00-36.10	22.0	1.4×10^{-7}	6.2×10^{-9}
36.00-38.10	8.40	4.0×10^{-5}	4.8×10^{-6}
38.00-40.10	22.2	2.6×10^{-8}	1.2×10^{-9}
40.00-42.10	21.1	2.6×10^{-7}	1.2×10^{-8}
42.00-44.10	20.4	2.6×10^{-6}	1.3×10^{-7}
44.00-46.10	20.6	5.0×10^{-8}	2.4×10^{-9}
46.00-48.10	19.3	3.6×10^{-6}	1.9×10^{-7}
48.00-50.10	0.20	6.5×10^{-5}	2.8×10^{-4}
47.00-49.10	20.3	2.5×10^{-8}	1.2×10^{-9}
49.50-51.60	0.14	7.0×10^{-5}	5.0×10^{-4}
50.00-52.10	14.2	3.2×10^{-5}	2.3×10^{-6}
52.00-54.10	24.2	2.7×10^{-6}	1.1×10^{-7}
54.00-56.10	25.0	1.5×10^{-7}	6.1×10^{-9}
55.00-57.10	24.2	1.5×10^{-7}	6.1×10^{-9}
57.00-59.10	23.6	1.1×10^{-7}	4.7×10^{-9}
58.00-60.10	23.4	2.8×10^{-7}	1.2×10^{-8}
60.00-62.10	23.5	1.7×10^{-7}	7.4×10^{-9}
62.00-64.10	23.9	3.7×10^{-8}	1.6×10^{-9}
64.00-66.10	23.3	2.6×10^{-8}	1.1×10^{-9}
66.00-68.10	22.5	5.7×10^{-7}	2.5×10^{-8}
68.00-70.10	23.1	2.9×10^{-8}	1.3×10^{-9}
70.00-72.10	21.9	6.0×10^{-9}	2.7×10^{-10}
71.00-73.10	22.9	6.7×10^{-10} †	2.9×10^{-11}

* Sous le sommet du tubage.
† Débit minimum mesurable.

Tableau B-8. Sommaire des essais d'injection, trou d'essai FS-8

Profondeur de l'intervalle d'essai (m S.S.T.*)	Hauteur d'injection ΔH (m)	Débit Q ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Débit par unité de hauteur Q/ΔH ($m^2 \cdot s^{-1}$)
8.00-10.27	14.8	2.7×10^{-9}	1.8×10^{-10}
10.00-12.27	14.8	5.7×10^{-9}	3.9×10^{-10}
12.00-14.27	17.4	9.5×10^{-9}	5.5×10^{-10}
14.00-16.27	17.5	4.2×10^{-9}	2.4×10^{-10}
16.00-18.27	16.9	9.5×10^{-9}	5.6×10^{-10}
18.00-20.27	17.0	5.3×10^{-9}	3.1×10^{-10}
20.00-22.27	16.7	7.6×10^{-9}	4.6×10^{-10}
22.00-24.27	18.6	7.6×10^{-9}	4.1×10^{-10}
24.00-26.27	16.7	1.3×10^{-8}	8.0×10^{-10}
26.00-28.27	9.80	2.6×10^{-5}	2.6×10^{-6}
28.00-30.27	2.30	4.2×10^{-5}	1.8×10^{-5}
30.00-32.27	16.8	6.2×10^{-7}	3.7×10^{-8}
32.00-34.27	17.8	1.9×10^{-9}	1.1×10^{-10}
34.00-36.27	17.7	3.6×10^{-8}	2.0×10^{-9}
36.00-38.27	16.0	3.4×10^{-8}	2.1×10^{-9}
38.00-40.27	16.5	2.7×10^{-8}	1.6×10^{-10}

* Sous le sommet du tubage.

Tableau B-9. Sommaire des essais d'injection, trou d'essai FS-9

Profondeur de l'intervalle d'essai (m S.S.T.*)	Hauteur d'injection ΔH (m)	Débit Q ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Débit par unité de hauteur Q/ΔH ($m^2 \cdot s^{-1}$)
8.00-10.27	12.6	1.3×10^{-8}	1.0×10^{-9}
10.00-12.27	13.9	8.2×10^{-7}	5.6×10^{-8}
12.00-14.27	15.4	5.7×10^{-9}	3.7×10^{-10}
14.00-16.27	14.7	4.6×10^{-9}	3.1×10^{-10}
16.00-18.27	15.1	2.2×10^{-8}	1.5×10^{-10}
18.00-20.27	14.2	4.2×10^{-9}	3.0×10^{-10}
20.00-22.27	16.6	7.6×10^{-10}	4.6×10^{-11}
22.00-24.27	16.1	9.1×10^{-9}	5.7×10^{-10}
24.00-26.27	15.3	2.1×10^{-8}	1.4×10^{-9}
26.00-28.27	14.3	4.7×10^{-7}	3.3×10^{-8}
28.00-30.27	13.9	4.3×10^{-7}	3.1×10^{-8}
30.00-32.27	14.7	8.6×10^{-8}	5.9×10^{-9}
32.00-34.27	0.40	5.1×10^{-5}	1.3×10^{-4}
34.00-36.27	14.7	1.5×10^{-9}	1.0×10^{-10}
36.00-38.27	14.3	1.7×10^{-8}	1.2×10^{-9}
38.00-40.27	15.3	3.4×10^{-6}	2.2×10^{-7}

* Sous le sommet du tubage.

Tableau B-10. Sommaire des essais d'injection, trou d'essai FS-10

Profondeur de l'intervalle d'essai (m S.S.T.*)	Hauteur d'injection ΔH (m)	Débit Q ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Débit par unité de hauteur Q/ΔH ($m^2 \cdot s^{-1}$)
12.00-14.10	11.3	9.4×10^{-9}	8.3×10^{-10}
14.00-16.10	11.5	6.7×10^{-10}†	5.9×10^{-11}
16.00-18.10	10.7	2.0×10^{-8}	1.9×10^{-9}
18.00-20.10	12.2	2.1×10^{-8}	1.8×10^{-9}
20.00-22.10	12.5	6.7×10^{-10}†	5.4×10^{-11}
22.00-24.10	13.2	6.7×10^{-10}†	5.1×10^{-11}
24.00-26.10	12.4	1.1×10^{-8}	8.7×10^{-10}
26.00-28.10	14.4	8.7×10^{-9}	6.1×10^{-10}
28.00-30.10	14.9	8.7×10^{-9}	5.9×10^{-10}
30.00-32.10	15.6	5.4×10^{-9}	3.5×10^{-10}
32.00-34.10	15.6	7.4×10^{-9}	4.7×10^{-10}
34.00-36.10	12.8	1.8×10^{-8}	1.4×10^{-9}
36.00-38.10	12.6	8.7×10^{-8}	6.9×10^{-9}
38.00-40.10	14.7	4.0×10^{-9}	2.7×10^{-10}
40.00-42.10	12.3	1.9×10^{-8}	1.5×10^{-9}
42.00-44.10	2.00	6.7×10^{-5}	3.4×10^{-5}
44.00-46.10	22.2	1.5×10^{-7}	6.7×10^{-9}
45.58-47.68	25.8	1.0×10^{-8}	3.9×10^{-10}

* Sous le sommet du tubage.
† Débit minimum mesurable.

Tableau B-11. Sommaire des essais d'injection, trou d'essai FS-11

Profondeur de l'intervalle d'essai (m S.S.T.*)	Hauteur d'injection ΔH (m)	Débit Q ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Débit par unité de hauteur Q/ΔH ($m^2 \cdot s^{-1}$)
6.00- 8.10	17.2	1.7×10^{-8}	9.7×10^{-10}
8.00-10.10	10.6	2.7×10^{-8}	2.5×10^{-9}
10.00-12.10	17.2	1.3×10^{-8}	7.8×10^{-10}
12.00-14.10	17.7	4.8×10^{-8}	2.7×10^{-9}
14.00-16.10	19.2	6.7×10^{-10}†	3.5×10^{-11}
16.00-18.10	20.0	6.7×10^{-10}†	3.4×10^{-11}
18.00-20.10	14.8	6.7×10^{-10}†	4.5×10^{-11}
20.00-22.10	18.8	6.7×10^{-10}†	3.6×10^{-11}
22.00-24.10	16.6	2.8×10^{-8}	1.7×10^{-9}
24.00-26.10	17.7	6.7×10^{-10}†	3.8×10^{-11}
26.00-28.10	18.1	6.7×10^{-10}†	3.7×10^{-11}
28.00-30.10	17.8	8.1×10^{-9}	4.5×10^{-10}
30.00-32.10	18.9	3.6×10^{-8}	1.9×10^{-9}
32.00-34.10	14.5	4.0×10^{-8}	2.8×10^{-9}
34.00-36.10	8.10	2.2×10^{-5}	2.7×10^{-6}
36.00-38.10	18.8	6.7×10^{-9}	3.6×10^{-10}
38.00-40.10	11.7	1.7×10^{-5}	1.5×10^{-6}
40.00-42.10	23.9	3.1×10^{-8}	1.3×10^{-9}
40.42-42.52	23.5	1.5×10^{-8}	6.3×10^{-10}

* Sous le sommet du tubage.
† Débit minimum mesurable.

Tableau B-12. Sommaire des essais d'injection, trou d'essai FS-12

Profondeur de l'intervalle d'essai (m S.S.T.*)	Hauteur d'injection ΔH (m)	Débit Q ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Débit par unité de hauteur Q/ΔH ($m^2 \cdot s^{-1}$)
6.00- 8.10	5.80	1.0×10^{-8}	1.7×10^{-9}
8.00-18.00†	7.46	3.3×10^{-7}	4.4×10^{-8}
18.00-20.10	13.2	1.7×10^{-8}	1.4×10^{-9}
20.00-22.10	12.1	6.1×10^{-8}	1.0×10^{-8}
22.00-24.10	13.0	2.2×10^{-8}	1.7×10^{-9}
24.00-26.10	13.2	1.9×10^{-8}	1.4×10^{-9}
26.00-28.10	13.1	6.7×10^{-9}	5.1×10^{-10}
28.00-30.10	13.3	4.7×10^{-9}	3.5×10^{-10}
30.00-32.10	12.4	2.7×10^{-9}	2.2×10^{-10}
32.00-34.10	12.6	6.7×10^{-10} ‡	8.0×10^{-11}
34.00-36.10	..8	7.1×10^{-8}	6.0×10^{-9}
36.00-38.10	12.7	6.4×10^{-8}	5.0×10^{-9}
38.00-40.10	12.9	3.4×10^{-8}	2.6×10^{-9}
40.00-42.10	12.8	3.6×10^{-8}	2.8×10^{-9}
40.55-42.65	11.9	1.2×10^{-7}	9.7×10^{-9}

* Sous le sommet du tubage.
† Données de pompages d'essai
‡ Débit minimum mesurable.

Tableau B-13. Sommaire des essais d'injection, trou d'essai FS-13

Profondeur de l'intervalle d'essai (m S.S.T.*)	Hauteur d'injection ΔH (m)	Débit Q ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Débit par unité de hauteur Q/ΔH ($m^2 \cdot s^{-1}$)
8.00-10.10	16.2	5.2×10^{-8}	3.2×10^{-9}
10.00-12.10	16.9	1.7×10^{-7}	1.0×10^{-8}
12.00-14.10	16.8	5.4×10^{-8}	3.2×10^{-9}
14.00-16.10	16.5	4.0×10^{-7}	2.0×10^{-8}
16.00-18.10	16.6	8.1×10^{-9}	4.9×10^{-10}
18.00-20.10	13.4	8.7×10^{-6}	6.5×10^{-7}
20.00-22.10	15.5	2.7×10^{-9}	1.7×10^{-10}
22.00-24.10	15.5	4.7×10^{-9}	3.0×10^{-10}
24.00-26.10	14.7	5.4×10^{-9}	3.7×10^{-10}
26.00-28.10	11.2	1.1×10^{-7}	9.8×10^{-9}
28.00-30.10	13.6	1.7×10^{-8}	1.2×10^{-9}
30.00-32.10	12.2	4.6×10^{-8}	3.8×10^{-9}
32.00-34.10	12.1	7.6×10^{-7}	6.3×10^{-8}
34.00-36.10	15.1	1.1×10^{-7}	7.5×10^{-9}
36.00-38.10	11.5	2.8×10^{-5}	2.4×10^{-6}
38.00-40.10	14.3	1.6×10^{-7}	1.1×10^{-8}
40.00-42.10	17.0	1.6×10^{-7}	9.5×10^{-9}

* Sous le sommet du tubage.

Tableau B-14. Sommaire des essais d'injection, trou d'essai FS-14

Profondeur de l'intervalle d'essai (m S.S.T.*)	Hauteur d'injection ΔH (m)	Débit Q ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Débit par unité de hauteur Q/ΔH ($m^2 \cdot s^{-1}$)
5.80-26.00†	8.43	5.6×10^{-7}	6.6×10^{-8}
26.00-28.10	14.1	1.5×10^{-8}	1.0×10^{-9}
28.00-30.10	14.5	6.7×10^{-10} ‡	4.6×10^{-11}
30.00-32.10	14.9	6.7×10^{-10} ‡	4.5×10^{-11}
32.00-34.10	14.4	6.7×10^{-10} ‡	4.7×10^{-11}
34.00-37.41†	9.71	1.9×10^{-9}	2.0×10^{-10}
38.10-42.13†	12.9	1.9×10^{-10}	1.5×10^{-11}

* Sous le sommet du tubage.
† Données de pompages d'essai.
‡ Débit minimum mesurable.

Tableau B-15. Sommaire des essais d'injection, trou d'essai FS-15

Profondeur de l'intervalle d'essai (m S.S.T.*)	Hauteur d'injection ΔH (m)	Débit Q ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Débit par unité de hauteur Q/ΔH ($m^2 \cdot s^{-1}$)
7.50- 9.05	19.6	2.4×10^{-8}	1.2×10^{-9}
9.00-10.55	20.8	2.5×10^{-8}	1.2×10^{-9}
10.50-12.05	13.4	1.6×10^{-6}	1.2×10^{-7}
12.00-13.55	14.8	2.8×10^{-7}	1.9×10^{-8}
13.50-15.05	15.2	3.6×10^{-8}	2.4×10^{-9}
15.00-16.55	16.7	8.5×10^{-8}	5.1×10^{-9}
16.50-18.05	7.28	1.6×10^{-6}	2.2×10^{-7}
18.00-19.55	8.32	5.1×10^{-8}	6.1×10^{-8}
19.50-21.05	7.16	1.9×10^{-6}	2.7×10^{-7}
21.00-22.55	9.97	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-7}
22.50-24.05	14.4	1.1×10^{-5}	8.0×10^{-7}
24.00-25.55	15.7	1.3×10^{-5}	8.2×10^{-7}
25.50-27.05	14.9	4.9×10^{-9}	3.3×10^{-9}
27.00-28.55	15.6	1.7×10^{-8}	1.1×10^{-9}
28.50-30.05	17.0	8.7×10^{-6}	5.3×10^{-7}
30.00-31.55	11.8	3.3×10^{-8}	2.8×10^{-9}
31.50-33.05	14.1	1.8×10^{-5}	1.3×10^{-6}
33.00-34.55	14.3	2.0×10^{-5}	1.4×10^{-6}
34.50-36.05	9.28	5.1×10^{-6}	5.5×10^{-7}
36.00-37.55	13.2	5.7×10^{-6}	4.3×10^{-7}
37.50-39.05	18.1	1.2×10^{-8}	6.7×10^{-10}
39.00-40.55	20.2	1.7×10^{-7}	8.6×10^{-9}
40.50-42.05	19.7	7.4×10^{-8}	3.8×10^{-9}
42.00-43.55	18.8	1.0×10^{-6}	5.5×10^{-8}
43.50-45.05	16.2	4.0×10^{-6}	2.5×10^{-7}
45.00-46.55	20.5	4.0×10^{-7}	1.9×10^{-8}
45.74-47.29	12.7	2.0×10^{-5}	1.6×10^{-6}

*Sous le sommet du tubage.

Tableau B-16. Sommaire des essais d'injection, trou d'essai FS-16

Profondeur de l'intervalle d'essai (m S.S.T.*)	Hauteur d'injection ΔH (m)	Débit Q ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Débit par unité de hauteur Q/ΔH ($m^2 \cdot s^{-1}$)
10.50-12.05	20.9	4.9×10^{-7}	2.4×10^{-8}
12.00-13.55	19.6	9.9×10^{-8}	5.1×10^{-9}
13.50-15.05	19.4	9.9×10^{-8}	5.1×10^{-9}
15.00-16.55	25.6	2.1×10^{-8}	8.3×10^{-10}
16.50-18.05	23.8	2.3×10^{-7}	9.9×10^{-9}
18.00-19.55	24.1	1.7×10^{-7}	7.2×10^{-9}
19.50-21.05	22.4	1.1×10^{-7}	4.9×10^{-9}
21.00-22.55	24.0	4.9×10^{-8}	2.1×10^{-9}
22.50-24.05	23.7	4.9×10^{-8}	2.1×10^{-9}
24.00-25.55	23.2	4.6×10^{-8}	2.0×10^{-9}
25.50-27.05	23.6	1.2×10^{-8}	5.0×10^{-10}
27.00-28.55	23.2	2.3×10^{-8}	9.8×10^{-10}
28.50-30.05	23.3	5.2×10^{-9}	2.2×10^{-10}
30.00-31.55	24.4	1.1×10^{-8}	4.3×10^{-10}
31.50-33.05	24.2	7.4×10^{-8}	3.1×10^{-9}
33.00-34.55	23.6	1.3×10^{-6}	5.6×10^{-8}
34.50-36.05	23.7	5.2×10^{-7}	2.2×10^{-8}
36.00-37.55	24.9	1.3×10^{-8}	5.1×10^{-10}
37.50-39.05	25.0	4.9×10^{-8}	2.0×10^{-9}
39.00-41.55	20.9	1.8×10^{-5}	8.6×10^{-7}
40.50-42.05	17.6	1.0×10^{-5}	5.8×10^{-7}
42.00-43.55	15.8	9.1×10^{-9}	5.8×10^{-10}
43.50-45.05	9.22	9.4×10^{-8}	8.1×10^{-9}
45.00-46.55	10.0	1.4×10^{-8}	1.4×10^{-9}
46.50-48.05	8.94	1.6×10^{-8}	1.8×10^{-9}
47.48-49.03	1.57	3.6×10^{-5}	2.3×10^{-5}

* Sous le sommet du tubage.

Tableau B-17. Sommaire des essais d'injection, trou d'essai FS-17

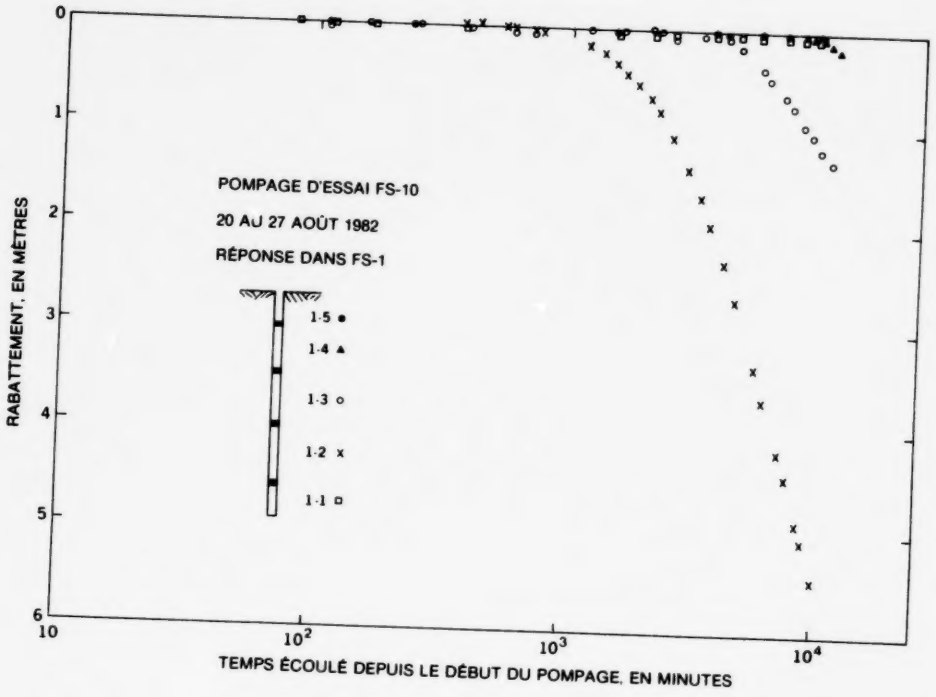
Profondeur de l'intervalle d'essai (m S.S.T.*)	Hauteur d'injection ΔH (m)	Débit Q ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Débit par unité de hauteur Q/ΔH ($m^3 \cdot s^{-1}$)
8.38- 9.93	12.6	8.1×10^{-9}	6.4×10^{-10}
9.88-11.43	12.4	3.5×10^{-9}	2.8×10^{-10}
11.38-12.93	11.9	2.0×10^{-7}	1.7×10^{-8}
12.88-14.43	11.2	2.9×10^{-7}	2.6×10^{-8}
14.38-15.93	12.2	1.2×10^{-7}	9.5×10^{-9}
15.88-17.43	12.1	6.3×10^{-6}	5.2×10^{-7}
17.38-18.93	11.4	6.5×10^{-6}	5.7×10^{-7}
18.88-20.43	14.8	9.0×10^{-8}	6.1×10^{-9}
20.38-21.93	14.7	6.3×10^{-7}	4.3×10^{-8}
21.88-23.43	12.2	8.8×10^{-6}	7.1×10^{-7}
23.38-24.93	13.8	1.7×10^{-6}	1.2×10^{-7}
24.88-26.43	14.9	9.9×10^{-8}	6.6×10^{-9}
26.38-27.93	13.4	7.8×10^{-7}	5.8×10^{-8}
27.88-29.43	11.7	2.3×10^{-6}	1.9×10^{-7}
29.38-30.93	13.3	6.4×10^{-7}	4.8×10^{-8}
30.88-32.43	8.80	1.4×10^{-5}	1.6×10^{-6}
32.38-33.93	1.04	3.6×10^{-5}	3.4×10^{-5}
33.88-35.43	11.6	2.7×10^{-5}	2.3×10^{-6}
35.38-36.93	12.1	1.7×10^{-5}	1.4×10^{-6}
36.88-38.43	13.9	9.0×10^{-6}	6.5×10^{-7}
38.38-39.93	17.3	2.4×10^{-7}	1.4×10^{-8}
39.88-41.43	19.1	2.1×10^{-7}	1.1×10^{-8}
41.38-42.93	18.8	8.7×10^{-8}	4.6×10^{-9}
42.88-44.43	12.5	1.1×10^{-5}	9.2×10^{-7}
44.38-45.93	2.97	2.9×10^{-5}	9.9×10^{-6}
45.88-47.43	18.2	1.1×10^{-7}	6.0×10^{-9}
47.38-48.93	17.1	6.3×10^{-5}	3.7×10^{-7}
48.88-50.43	16.7	1.7×10^{-6}	9.9×10^{-8}
50.38-51.93	6.03	2.9×10^{-5}	4.9×10^{-6}
51.88-53.43	5.82	2.7×10^{-5}	4.6×10^{-6}
53.38-54.93	14.7	8.3×10^{-6}	5.6×10^{-7}
54.88-56.43	16.5	8.4×10^{-7}	5.1×10^{-8}
56.38-57.93	19.0	2.5×10^{-7}	1.3×10^{-8}
57.18-58.73	18.7	1.4×10^{-7}	7.3×10^{-9}

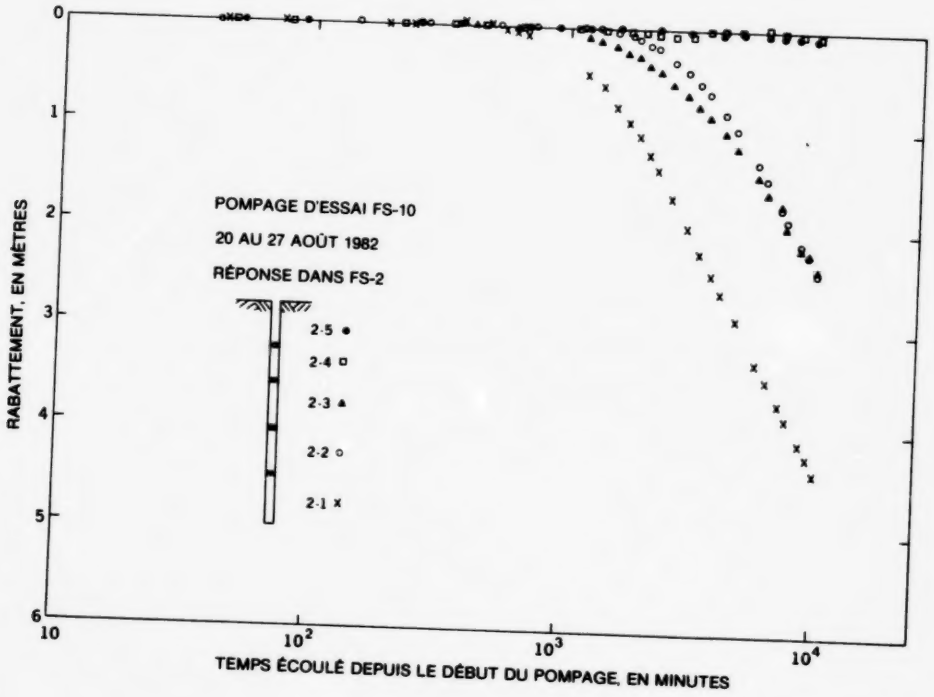
* Sous le sommet du tubage.

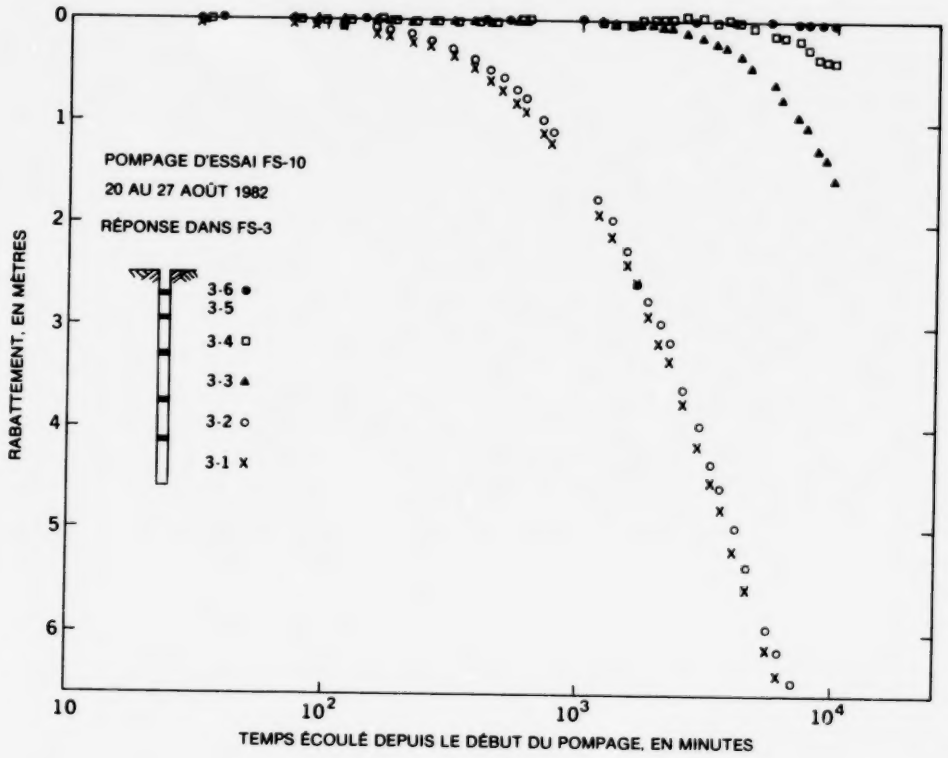
Courbes du rabattement en fonction du temps (log), en réponse aux pompages d'essai dans la zone de fractures nº 1 effectués du 20 au 27 août 1982 et du 27 au 29 septembre 1983 à partir du trou de sondage FS-10.

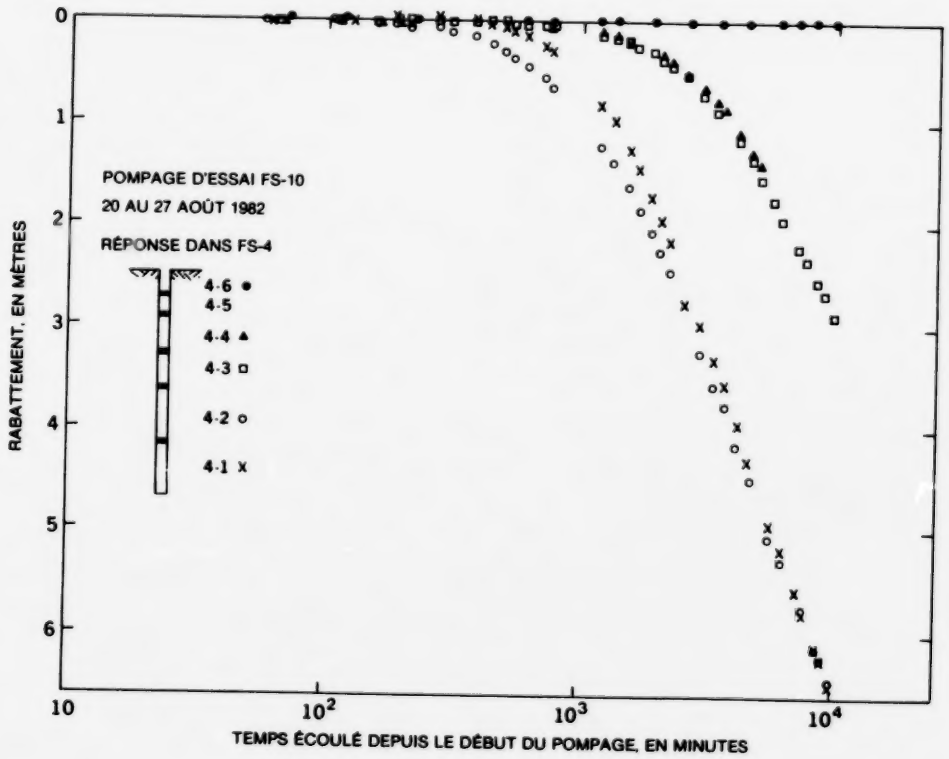
Annexe C

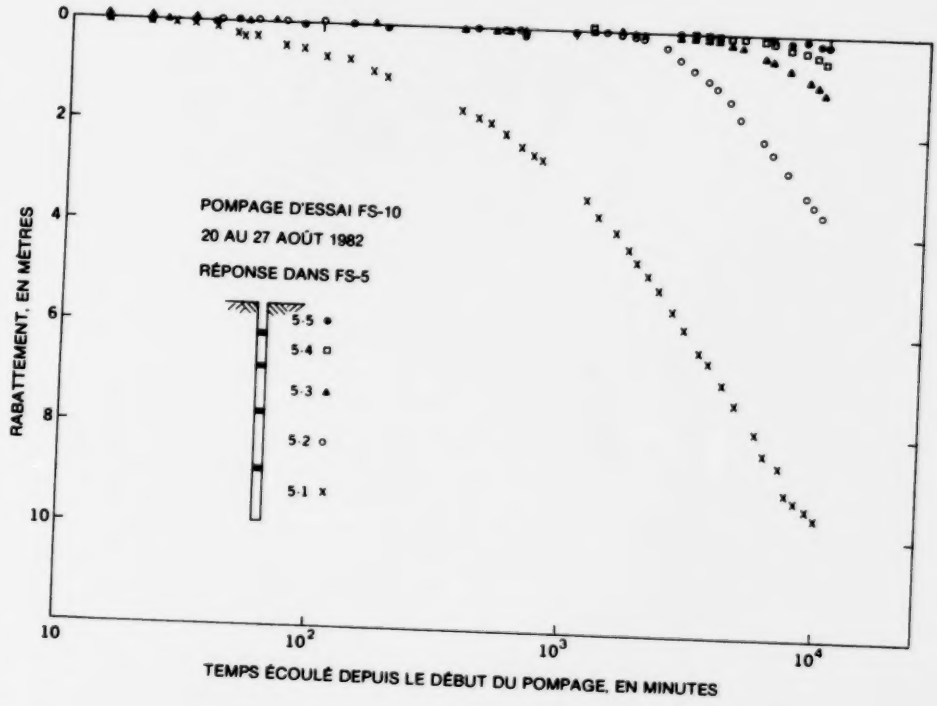
Courbes du rabattement en fonction du temps (log), Trou de sondage FS-10

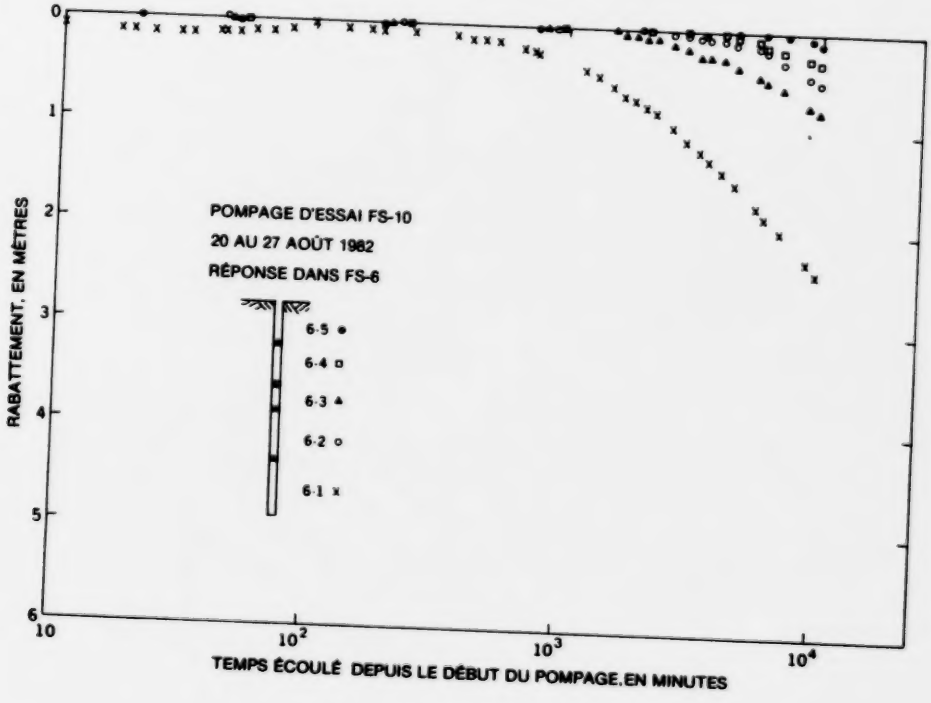

POMPAGE D'ESSAI FS-10
20 AU 27 AOÛT 1982
RÉPONSE DANS FS-1
1-5
1-4
1-3
1-2
1-1
RABATTEMENT, EN MÈTRES
TEMPS ÉCOULÉ DEPUIS LE DÉBUT DU POMPAGE, EN MINUTES

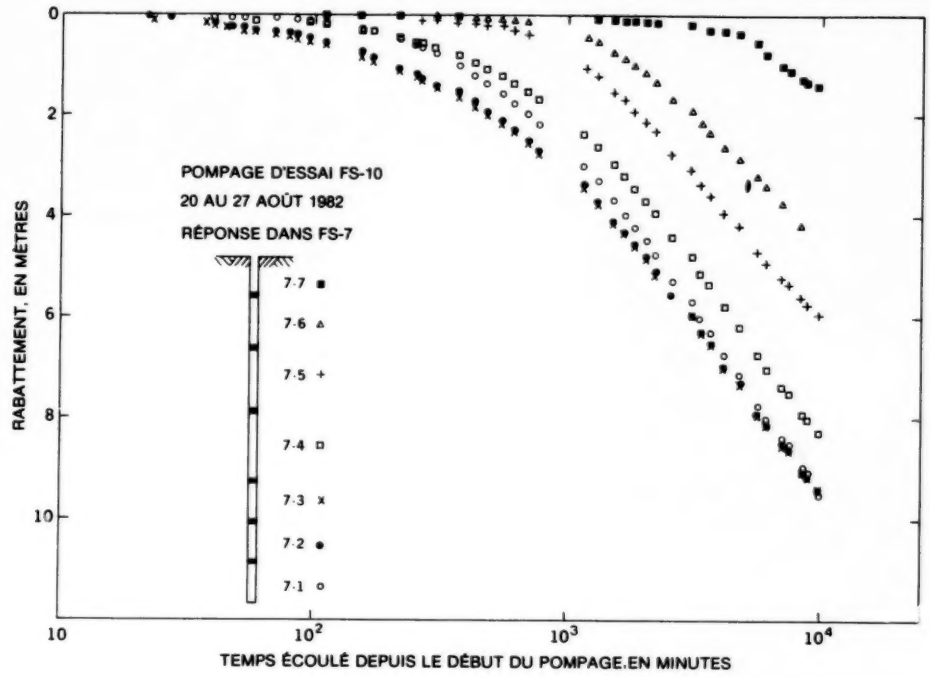

POMPAGE D'ESSAI FS-10
20 AU 27 AOÛT 1982
RÉPONSE DANS FS-2
2-5
2-4
2-3
2-2
2-1
RABATTEMENT, EN MÈTRES
TEMPS ÉCOULÉ DEPUIS LE DÉBUT DU POMPAGE, EN MINUTES

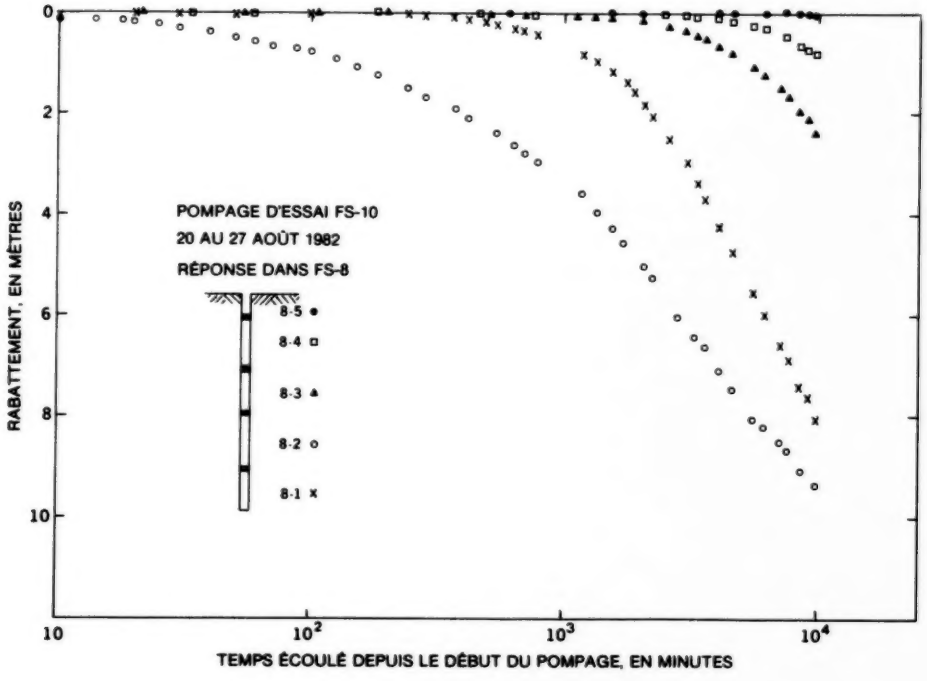

POMPAGE D'ESSAI FS-10
20 AU 27 AOÛT 1982
RÉPONSE DANS FS-3
3-6
3-5
3-4
3-3
3-2
3-1
RABATTEMENT, EN MÈTRES
TEMPS ÉCOULÉ DEPUIS LE DÉBUT DU POMPAGE, EN MINUTES

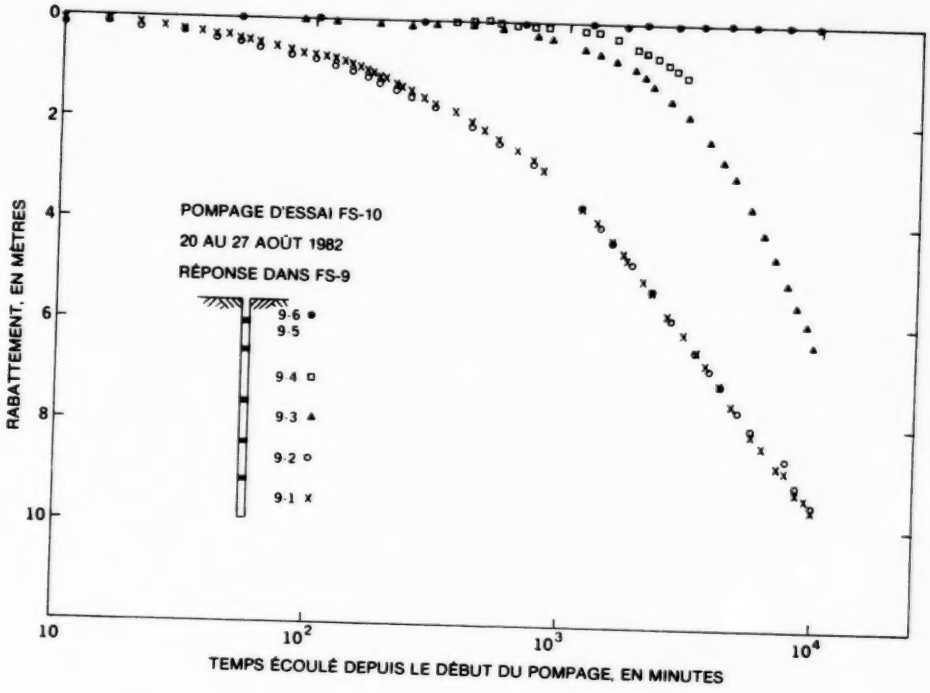

POMPAGE D'ESSAI FS-10
20 AU 27 AOÛT 1982
RÉPONSE DANS FS-4
4-6
4-5
4-4
4-3
4-2
4-1
RABATTEMENT, EN MÈTRES
TEMPS ÉCOULÉ DEPUIS LE DÉBUT DU POMPAGE, EN MINUTES

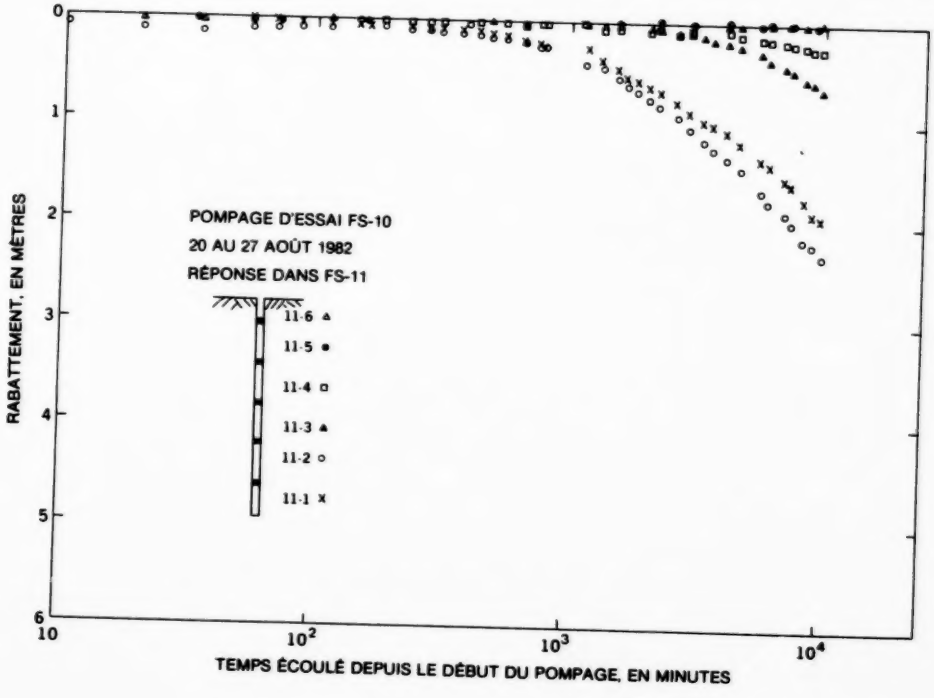

POMPAGE D'ESSAI FS-10
20 AU 27 AOÛT 1982
RÉPONSE DANS FS-5
5-5
5-4
5-3
5-2
5-1
RABATTEMENT, EN MÈTRES
TEMPS ÉCOULÉ DEPUIS LE DÉBUT DU POMPAGE, EN MINUTES

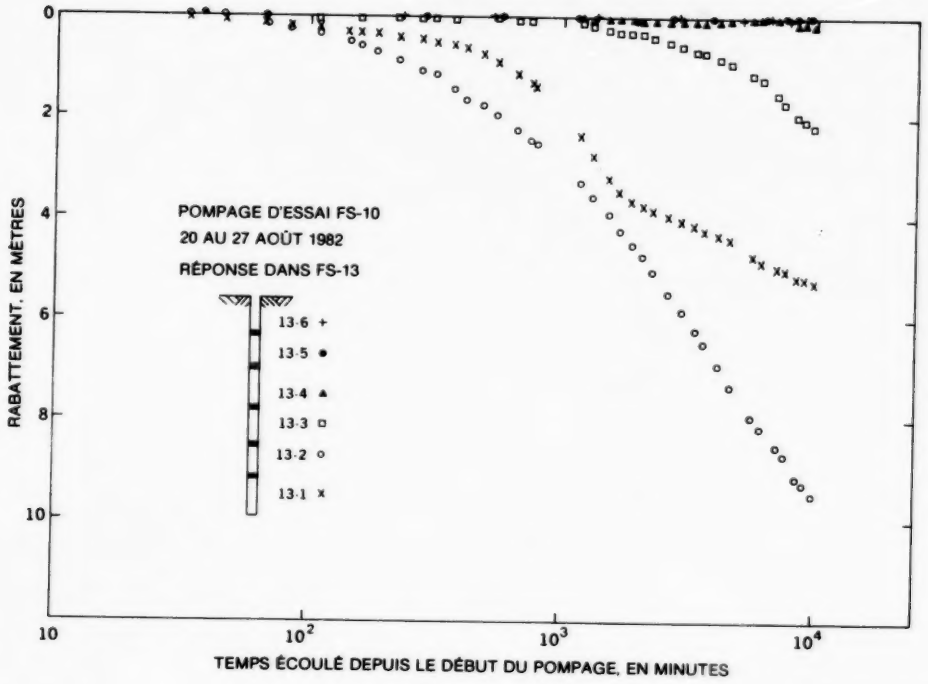

POMPAGE D'ESSAI FS-10
20 AU 27 AOÛT 1982
RÉPONSE DANS FS-6
6-5
6-4
6-3
6-2
6-1
RABATTEMENT, EN MÈTRES
TEMPS ÉCOULÉ DEPUIS LE DÉBUT DU POMPAGE, EN MINUTES

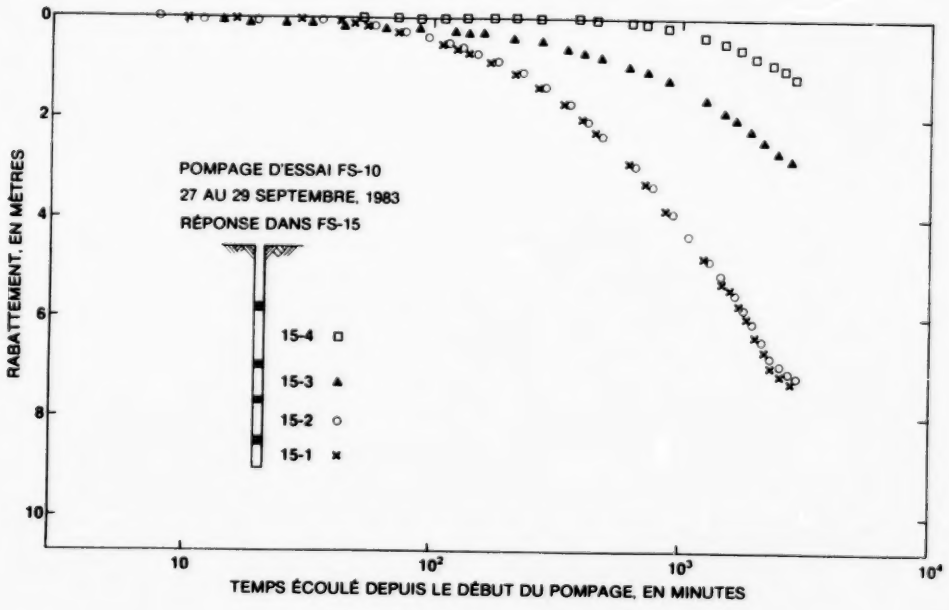

POMPAGE D'ESSAI FS-10
20 AU 27 AOÛT 1982
RÉPONSE DANS FS-7
7-7
7-6
7-5
7-4
7-3
7-2
7-1
RABATTEMENT, EN MÈTRES
TEMPS ÉCOULÉ DEPUIS LE DÉBUT DU POMPAGE.EN MINUTES

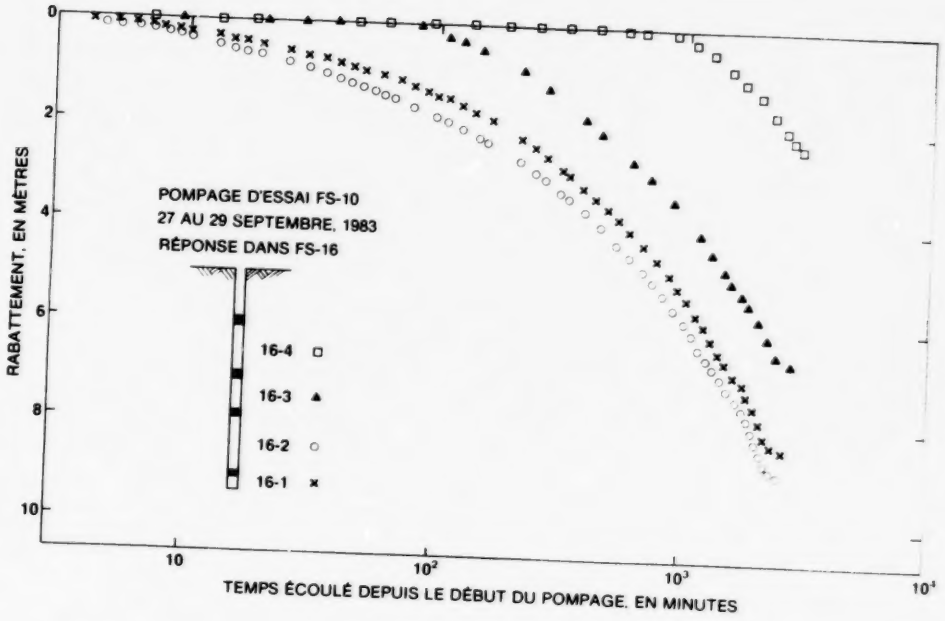

POMPAGE D'ESSAI FS-10
20 AU 27 AOÛT 1982
RÉPONSE DANS FS-8
8-5
8-4
8-3
8-2
8-1
RABATTEMENT, EN MÈTRES
TEMPS ÉCOULÉ DEPUIS LE DÉBUT DU POMPAGE, EN MINUTES

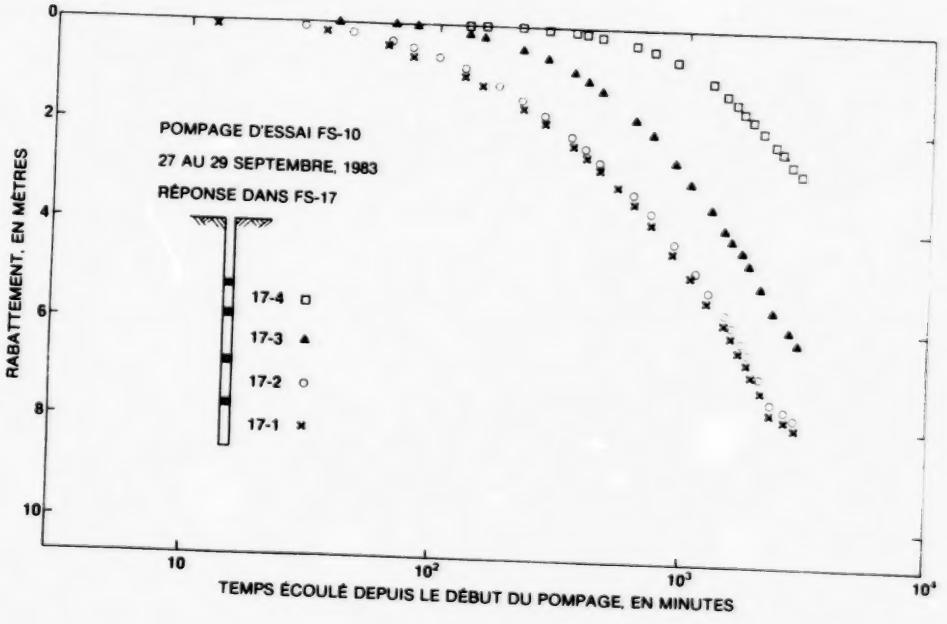

POMPAGE D'ESSAI FS-10
20 AU 27 AOÛT 1982
RÉPONSE DANS FS-9
9-6
9-5
9-4
9-3
9-2
9-1
RABATTEMENT, EN MÈTRES
TEMPS ÉCOULÉ DEPUIS LE DÉBUT DU POMPAGE, EN MINUTES


POMPAGE D'ESSAI FS-10
20 AU 27 AOÛT 1982
RÉPONSE DANS FS-11
11-6
11-5
11-4
11-3
11-2
11-1
RABATTEMENT, EN MÈTRES
TEMPS ÉCOULÉ DEPUIS LE DÉBUT DU POMPAGE, EN MINUTES


POMPAGE D'ESSAI FS-10
20 AU 27 AOÛT 1982
RÉPONSE DANS FS-13
13-6 +
13-5 •
13-4 ▲
13-3 □
13-2 ○
13-1 ×
RABATTEMENT, EN MÈTRES
0
2
4
6
8
10
10
10²
10³
10⁴
TEMPS ÉCOULÉ DEPUIS LE DÉBUT DU POMPAGE, EN MINUTES


POMPAGE D'ESSAI FS-10
27 AU 29 SEPTEMBRE, 1983
RÉPONSE DANS FS-15
15-4 □
15-3 ▲
15-2 ○
15-1 ×
RABATTEMENT, EN MÈTRES
0
2
4
6
8
10
10
10²
10³
10⁴
TEMPS ÉCOULÉ DEPUIS LE DÉBUT DU POMPAGE, EN MINUTES


POMPAGE D'ESSAI FS-10
27 AU 29 SEPTEMBRE, 1983
RÉPONSE DANS FS-16
16-4
16-3
16-2
16-1
RABATTEMENT, EN MÈTRES
TEMPS ÉCOULÉ DEPUIS LE DÉBUT DU POMPAGE, EN MINUTES


POMPAGE D'ESSAI FS-10
27 AU 29 SEPTEMBRE, 1983
RÉPONSE DANS FS-17
17-4
17-3
17-2
17-1
RABATTEMENT, EN MÈTRES
TEMPS ÉCOULÉ DEPUIS LE DÉBUT DU POMPAGE, EN MINUTES

Tenseurs de conductivité hydraulique déterminés, pour les intervalles d'essais FS, d'après les données des essais d'injection et les diagraphies de fractures enregistrées par image acoustique des trous de sondage.

Annexe D
Tenseurs de conductivité hydraulique

Tableau D-1. Conductivités hydrauliques principales et directions principales

Intervalle	Conductivités hydrauliques principales et directions principales*						Moyenne géométrique	Rapport d'anisotropie
	K_1 (m·s^{-1})	l_1* m_1 n_1	K_2 (m·s^{-1})	l_2 m_2 n_2	K_3 (m·s^{-1})	l_3 m_3 n_3	$(K_1K_2)^{1/2}$ (m·s^{-1})	K_1/K_3
FS 1-1	1.1×10^{-10}	−0.157 −0.873 −0.462	1.1×10^{-10}	−0.883 −0.086 −0.462	4.0×10^{-14}	0.443 −0.480 −0.757	1.1×10^{-10}	2750.0
FS 1-2	1.5×10^{-9}	0.216 −0.933 −0.288	1.4×10^{-9}	0.591 0.359 −0.722	4.4×10^{-10}	0.777 −0.014 0.630	1.5×10^{-9}	3.4
FS 1-3	1.9×10^{-8}	0.308 −0.316 −0.897	1.8×10^{-8}	−0.040 −0.947 0.319	4.9×10^{-9}	0.950 0.063 0.305	1.9×10^{-8}	3.9
FS 1-4	3.3×10^{-9}	0.325 −0.834 −0.447	2.0×10^{-9}	−0.311 −0.540 0.782	1.7×10^{-9}	0.893 0.115 0.434	2.7×10^{-9}	1.9
FS 1-5	3.7×10^{-10}	−0.247 −0.599 0.762	3.2×10^{-10}	−0.410 −0.648 −0.642	6.0×10^{-11}	−0.878 0.471 0.086	3.5×10^{-10}	6.2
FS 2-1	4.3×10^{-10}	−0.022 −0.723 0.691	2.8×10^{-10}	0.718 0.470 0.514	1.7×10^{-10}	0.696 −0.507 −0.508	3.67×10^{-10}	2.5
FS 2-2	7.3×10^{-9}	−0.272 −0.317 −0.909	6.7×10^{-9}	−0.876 −0.310 0.370	9.3×10^{-10}	0.399 −0.896 0.193	7.0×10^{-9}	7.8
FS 2-3	1.4×10^{-7}	0.527 −0.705 −0.475	1.3×10^{-7}	−0.817 −0.574 −0.057	6.1×10^{-8}	0.232 −0.418 0.878	1.4×10^{-7}	2.3
FS 2-4	8.6×10^{-8}	−0.310 −0.917 −0.252	8.4×10^{-8}	−0.090 0.293 −0.952	5.8×10^{-9}	0.946 −0.273 −0.173	8.5×10^{-8}	14.8
FS 2-5	2.1×10^{-10}	0.123 −0.933 −0.399	1.5×10^{-10}	−0.992 −0.103 −0.077	8.1×10^{-11}	−0.037 −0.346 0.938	1.8×10^{-10}	2.6
FS 3-1	3.4×10^{-9}	−0.169 −0.973 0.155	2.5×10^{-9}	0.907 −0.093 0.411	1.6×10^{-9}	−0.385 0.210 0.899	3.0×10^{-9}	2.1
FS 3-2	2.3×10^{-8}	−0.273 0.418 −0.866	1.9×10^{-8}	−0.894 0.223 0.389	7.3×10^{-9}	−0.356 −0.881 −0.313	2.1×10^{-8}	3.2
FS 3-3	4.4×10^{-9}	−0.805 −0.379 0.133	4.1×10^{-9}	−0.055 −0.150 −0.987	4.4×10^{-10}	0.591 −0.801 0.089	4.3×10^{-9}	10.0
FS 3-4	2.2×10^{-9}	−0.787 −0.602 −0.135	1.6×10^{-9}	0.270 −0.140 −0.953	7.5×10^{-10}	0.554 −0.786 0.273	1.9×10^{-9}	2.9
FS 3-5	3.9×10^{-10}	0.095 0.243 −0.966	3.7×10^{-10}	−0.462 0.870 0.173	2.1×10^{-11}	−0.882 −0.429 −0.195	3.8×10^{-10}	18.6
FS 4-1	5.3×10^{-10}	0.290 0.644 −0.708	5.2×10^{-10}	−0.282 0.765 0.579	2.7×10^{-11}	−0.914 −0.032 −0.404	5.3×10^{-10}	20.

Tableau D-1 (suite)

Intervalle	K_1 ($m \cdot s^{-1}$)	Conductivités hydrauliques principales et directions principales* l_1* m_1 n_1	K_2 ($m \cdot s^{-1}$)	l_2 m_2 n_2	K_3 ($m \cdot s^{-1}$)	l_3 m_3 n_3	Moyenne géométrique $(K_1K_2)^{1/2}$ ($m \cdot s^{-1}$)	Rapport d'anisotropie K_1/K_3
FS 4-2	1.9×10^{-7}	−0.982 −0.087 0.169	1.8×10^{-7}	−0.108 0.987 −0.118	3.1×10^{-8}	0.157 0.135 0.978	1.9×10^{-7}	6.1
FS 4-3	3.0×10^{-7}	−0.463 −0.773 0.435	2.9×10^{-7}	−0.858 0.515 0.002	1.7×10^{-8}	0.225 0.372 0.901	3.0×10^{-7}	18.0
FS 4-4	4.6×10^{-6}	0.871 0.352 −0.342	3.1×10^{-6}	−0.455 0.321 −0.830	1.7×10^{-6}	−0.183 0.879 0.440	3.9×10^{-6}	2.7
FS 5-1	1.7×10^{-7}	−0.716 −0.175 0.642	1.7×10^{-7}	−0.691 0.153 −0.706	9.6×10^{-9}	0.096 −0.949 −0.300	1.7×10^{-7}	18.0
FS 5-2	6.1×10^{-9}	−0.233 −0.278 0.932	5.0×10^{-9}	−0.496 −0.790 −0.360	1.8×10^{-9}	−0.836 0.546 −0.046	5.6×10^{-9}	3.4
FS 5-3	1.6×10^{-9}	−0.391 −0.822 0.415	1.4×10^{-9}	−0.393 −0.258 −0.882	4.0×10^{-10}	0.832 −0.508 −0.222	1.5×10^{-9}	4.0
FS 5-4	2.0×10^{-9}	−0.211 −0.977 −0.011	1.2×10^{-9}	0.839 −0.187 0.512	8.4×10^{-10}	−0.503 0.100 0.859	1.6×10^{-9}	2.4
FS 5-5	1.8×10^{-7}	−0.455 −0.849 0.269	1.6×10^{-7}	0.116 0.243 0.963	2.5×10^{-8}	−0.883 0.470 −0.012	1.7×10^{-7}	7.2
FS 6-1	6.1×10^{-6}	0.120 −0.163 0.979	5.5×10^{-6}	0.574 −0.794 −0.202	7.4×10^{-7}	−0.810 −0.586 0.002	5.8×10^{-6}	8.2
FS 6-2	1.7×10^{-9}	−0.225 0.691 −0.687	1.5×10^{-9}	0.098 0.718 0.689	3.2×10^{-10}	0.969 0.087 −0.230	1.6×10^{-9}	5.3
FS 6-3	4.5×10^{-8}	0.010 0.005 −0.999	4.1×10^{-8}	−0.180 0.984 0.004	4.2×10^{-9}	0.984 0.180 0.011	4.3×10^{-8}	10.0
FS 6-4	2.4×10^{-9}	−0.070 −0.975 0.212	2.0×10^{-9}	0.322 0.179 0.930	4.8×10^{-10}	−0.944 0.133 0.301	2.2×10^{-9}	5.0
FS 7-1	3.0×10^{-9}	−0.996 −0.058 0.061	1.9×10^{-9}	0.075 −0.281 0.957	1.3×10^{-9}	−0.039 0.958 0.284	2.5×10^{-9}	2.3
FS 7-2	1.4×10^{-8}	−0.496 0.830 −0.257	1.3×10^{-8}	−0.749 −0.258 0.611	1.2×10^{-9}	0.440 0.495 0.749	1.4×10^{-8}	12.0
FS 7-3	2.0×10^{-5}	−0.034 0.989 −0.146	2.0×10^{-5}	−0.775 0.066 0.629	1.0×10^{-7}	0.631 0.135 0.764	2.0×10^{-5}	200.0
FS 7-4	4.9×10^{-7}	0.076 0.670 −0.738	4.4×10^{-7}	−0.914 0.344 0.218	6.2×10^{-8}	−0.400 −0.658 −0.639	4.7×10^{-7}	8.1

Tableau D-1 (suite)

Intervalle	Conductivités hydrauliques principales et directions principales*						Moyenne géométrique	Rapport d'anisotropie
	K_1 ($m \cdot s^{-1}$)	l_1* m_1 n_1	K_2 ($m \cdot s^{-1}$)	l_2 m_2 n_2	K_3 ($m \cdot s^{-1}$)	l_3 m_3 n_3	$(K_1 K_2)^{1/2}$ ($m \cdot s^{-1}$)	K_1/K_3
FS 7-5	5.4×10^{-9}	−0.109 −0.387 0.916	4.7×10^{-9}	−0.362 −0.842 −0.399	1.9×10^{-9}	−0.926 0.375 0.049	5.1×10^{-9}	2.8
FS 7-6	6.9×10^{-9}	−0.745 −0.667 −0.003	4.4×10^{-9}	0.667 −0.745 0.020	2.7×10^{-9}	−0.015 0.013 1.000	5.7×10^{-9}	2.6
FS 7-7	4.0×10^{-8}	−0.835 −0.534 0.134	4.0×10^{-8}	0.443 −0.795 −0.414	9.3×10^{-10}	0.328 −0.287 0.900	4.0×10^{-8}	43.0
FS 8-1	Pas de données-images							
FS 8-2	4.2×10^{-5}	−0.076 0.992 0.103	4.1×10^{-5}	0.076 0.108 −0.991	1.4×10^{-6}	−0.994 −0.067 −0.084	4.2×10^{-5}	30.0
FS 8-3	1.2×10^{-8}	0.045 0.280 −0.959	1.2×10^{-8}	−0.183 0.946 0.268	4.7×10^{-10}	−0.982 −0.164 −0.094	1.2×10^{-8}	25.0
FS 8-4	3.1×10^{-9}	−0.209 0.955 −0.213	3.1×10^{-9}	0.171 −0.178 −0.969	4.3×10^{-11}	−0.963 −0.239 −0.126	3.1×10^{-9}	72.0
FS 9-1	4.1×10^{-8}	−0.214 −0.966 0.148	3.1×10^{-8}	0.919 −0.148 0.364	1.1×10^{-8}	−0.330 0.214 0.920	3.6×10^{-8}	3.7
FS 9-2	3.2×10^{-5}	−0.106 −0.984 0.146	1.9×10^{-5}	−0.198 −0.123 −0.973	1.4×10^{-5}	−0.975 0.132 0.182	2.5×10^{-5}	2.3
FS 9-3	5.9×10^{-9}	−0.075 0.886 −0.457	5.8×10^{-9}	0.507 −0.360 −0.783	3.1×10^{-10}	−0.858 −0.291 −0.423	5.9×10^{-9}	19.0
FS 9-4	1.0×10^{-8}	0.586 −0.687 0.430	7.6×10^{-9}	0.041 −0.505 −0.862	6.2×10^{-9}	−0.809 −0.523 0.268	8.7×10^{-9}	1.6
FS 10-1	3.5×10^{-6}	−0.079 −0.961 −0.266	2.5×10^{-6}	−0.996 0.085 −0.013	1.1×10^{-6}	−0.035 −0.264 0.964	3.0×10^{-6}	3.2
FS 10-2	1.6×10^{-9}	−0.605 0.445 −0.660	1.2×10^{-9}	−0.049 0.807 0.589	5.8×10^{-10}	−0.795 −0.389 0.466	1.4×10^{-9}	2.8
FS 10-3	2.3×10^{-9}	0.384 −0.254 0.888	2.2×10^{-9}	0.718 −0.523 −0.460	2.4×10^{-10}	−0.581 −0.814 0.019	2.3×10^{-9}	9.6
FS 10-4	7.6×10^{-10}	−0.563 0.826 0.023	7.0×10^{-10}	−0.449 −0.282 −0.848	7.4×10^{-11}	−0.695 −0.487 0.529	7.3×10^{-10}	10.0
FS 10-5	4.0×10^{-10}	−0.987 −0.119 −0.106	3.9×10^{-10}	0.061 0.336 −0.940	4.9×10^{-12}	0.148 −0.934 −0.325	4.0×10^{-10}	81.0

Tableau D-1 (suite)

Intervalle	Conductivités hydrauliques principales et directions principales*						Moyenne géométrique $(K_1K_2)^{1/2}$ $(m \cdot s^{-1})$	Rapport d'anisotropie K_1/K_3
	K_1 $(m \cdot s^{-1})$	l_1* m_1 n_1	K_2 $(m \cdot s^{-1})$	l_2 m_2 n_2	K_3 $(m \cdot s^{-1})$	l_3 m_3 n_3		
FS 11-1	4.2×10^{-7}	−0.809 0.542 0.227	3.5×10^{-7}	−0.234 −0.652 0.722	9.4×10^{-8}	0.539 0.531 0.654	3.8×10^{-7}	4.5
FS 11-2	1.6×10^{-6}	−0.479 0.387 0.788	1.6×10^{-6}	0.505 −0.613 0.608	3.8×10^{-9}	−0.718 0.689 −0.099	1.6×10^{-6}	420.
FS 11-3	3.4×10^{-10}	−0.366 −0.894 −0.261	3.4×10^{-10}	−0.210 0.352 −0.912	4.3×10^{-12}	0.907 −0.279 −0.317	3.4×10^{-10}	79.0
FS 11-4	3.6×10^{-11}	−0.845 0.466 −0.262	3.4×10^{-11}	0.247 −0.094 −0.964	1.2×10^{-11}	−0.474 −0.880 −0.036	3.5×10^{-11}	3.0
FS 11-5	5.8×10^{-10}	0.402 −0.369 0.838	3.1×10^{-10}	0.024 −0.911 −0.412	2.9×10^{-10}	−0.916 −0.185 0.357	4.2×10^{-10}	2.0
FS 12-1	3.9×10^{-9}	−0.607 −0.468 0.643	3.5×10^{-9}	−0.530 −0.365 −0.766	1.5×10^{-9}	−0.593 0.805 0.027	3.7×10^{-9}	2.6
FS 12-2	1.3×10^{-9}	0.464 −0.836 −0.293	1.2×10^{-9}	−0.872 −0.490 0.018	1.5×10^{-10}	0.159 −0.247 0.956	1.3×10^{-9}	8.7
FS 12-3	3.8×10^{-9}	−0.122 −0.496 0.860	2.7×10^{-9}	−0.642 0.701 0.313	1.5×10^{-9}	0.757 0.514 0.403	3.2×10^{-9}	2.5
FS 12-4	7.2×10^{-9}	0.491 −0.177 −0.853	7.0×10^{-9}	−0.380 0.838 −0.393	2.1×10^{-9}	−0.784 −0.517 −0.344	7.1×10^{-9}	3.4
FS 13-1	5.7×10^{-7}	0.629 −0.368 0.685	4.3×10^{-7}	0.441 −0.556 −0.704	2.1×10^{-7}	−0.640 −0.745 0.188	5.0×10^{-7}	2.7
FS 13-2	2.4×10^{-8}	0.691 −0.419 0.589	1.7×10^{-8}	0.602 −0.118 −0.790	7.1×10^{-9}	−0.400 −0.900 −0.171	2.0×10^{-8}	3.4
FS 13-3	1.2×10^{-8}	−0.634 0.269 0.726	1.2×10^{-8}	0.668 −0.284 0.688	1.6×10^{-9}	−0.391 −0.920 −0.001	1.3×10^{-8}	8.1
FS 13-4	1.7×10^{-7}	0.484 0.182 −0.856	1.3×10^{-7}	−0.719 0.641 −0.270	6.9×10^{-8}	−0.500 −0.746 −0.441	1.5×10^{-7}	2.5
FS 13-5	6.6×10^{-9}	0.507 −0.268 −0.819	5.4×10^{-9}	−0.382 0.782 −0.492	1.3×10^{-9}	−0.773 −0.562 −0.294	6.0×10^{-9}	5.1
FS 14-1	9.1×10^{-12}	−0.203 0.706 −0.679	8.2×10^{-12}	0.090 0.704 0.705	1.4×10^{-12}	0.975 0.083 −0.206	8.7×10^{-12}	6.5
FS 14-2	6.5×10^{-11}	0.084 0.629 0.773	6.5×10^{-11}	0.203 −0.770 0.605	3.7×10^{-11}	−0.976 −0.106 0.192	6.5×10^{-11}	1.8

Tableau D-1 (suite)

Intervalle	Conductivités hydrauliques principales et directions principales*						Moyenne géométrique	Rapport d'anisotropie
	K_1 ($m \cdot s^{-1}$)	l_1* m_1 n_1	K_2 ($m \cdot s^{-1}$)	l_2 m_2 n_2	K_3 ($m \cdot s^{-1}$)	l_3 m_3 n_3	$(K_1 K_2)^{1/2}$ ($m \cdot s^{-1}$)	K_1/K_3
FS 14-3	1.7×10^{-8}	−0.088 0.258 −0.962	1.5×10^{-8}	−0.451 0.851 0.269	2.6×10^{-9}	−0.888 −0.458 −0.042	1.6×10^{-8}	6.5
FS 14-4	3.7×10^{-8}	0.059 −0.128 0.990	3.1×10^{-8}	0.394 −0.908 −0.141	8.1×10^{-9}	−0.917 −0.399 0.003	3.4×10^{-8}	4.6
FS 15-1	2.0×10^{-6}	0.775 −0.355 0.524	1.7×10^{-6}	0.493 −0.182 −0.851	3.2×10^{-7}	−0.397 −0.917 −0.034	1.9×10^{-6}	6.3
FS 15-2	5.2×10^{-8}	0.482 −0.840 0.250	4.1×10^{-8}	−0.862 −0.506 −0.037	2.6×10^{-8}	−0.157 0.198 0.968	4.7×10^{-8}	2.0
FS 15-3	4.5×10^{-7}	0.535 −0.814 0.225	3.3×10^{-7}	0.273 −0.085 −0.958	3.0×10^{-7}	−0.799 −0.575 −0.177	3.9×10^{-7}	1.5
FS 15-4	1.8×10^{-6}	0.247 −0.729 0.639	1.5×10^{-6}	0.321 −0.561 −0.763	3.7×10^{-7}	−0.914 −0.394 −0.096	1.7×10^{-6}	4.9
FS 15-5	1.7×10^{-8}	−0.083 −0.986 0.147	1.4×10^{-8}	0.511 0.085 0.855	4.2×10^{-9}	−0.856 0.147 0.497	1.6×10^{-8}	4.1
FS 16-1	6.6×10^{-6}	0.069 0.956 0.284	6.1×10^{-6}	−0.874 −0.080 0.479	4.7×10^{-6}	0.481 −0.281 0.831	6.4×10^{-6}	1.4
FS 16-2	2.0×10^{-7}	0.707 −0.510 0.490	1.4×10^{-7}	−0.482 −0.855 −0.193	1.3×10^{-7}	0.517 −0.100 −0.850	1.7×10^{-7}	1.5

* Cosinus de direction par rapport aux axes de référence géographiques.